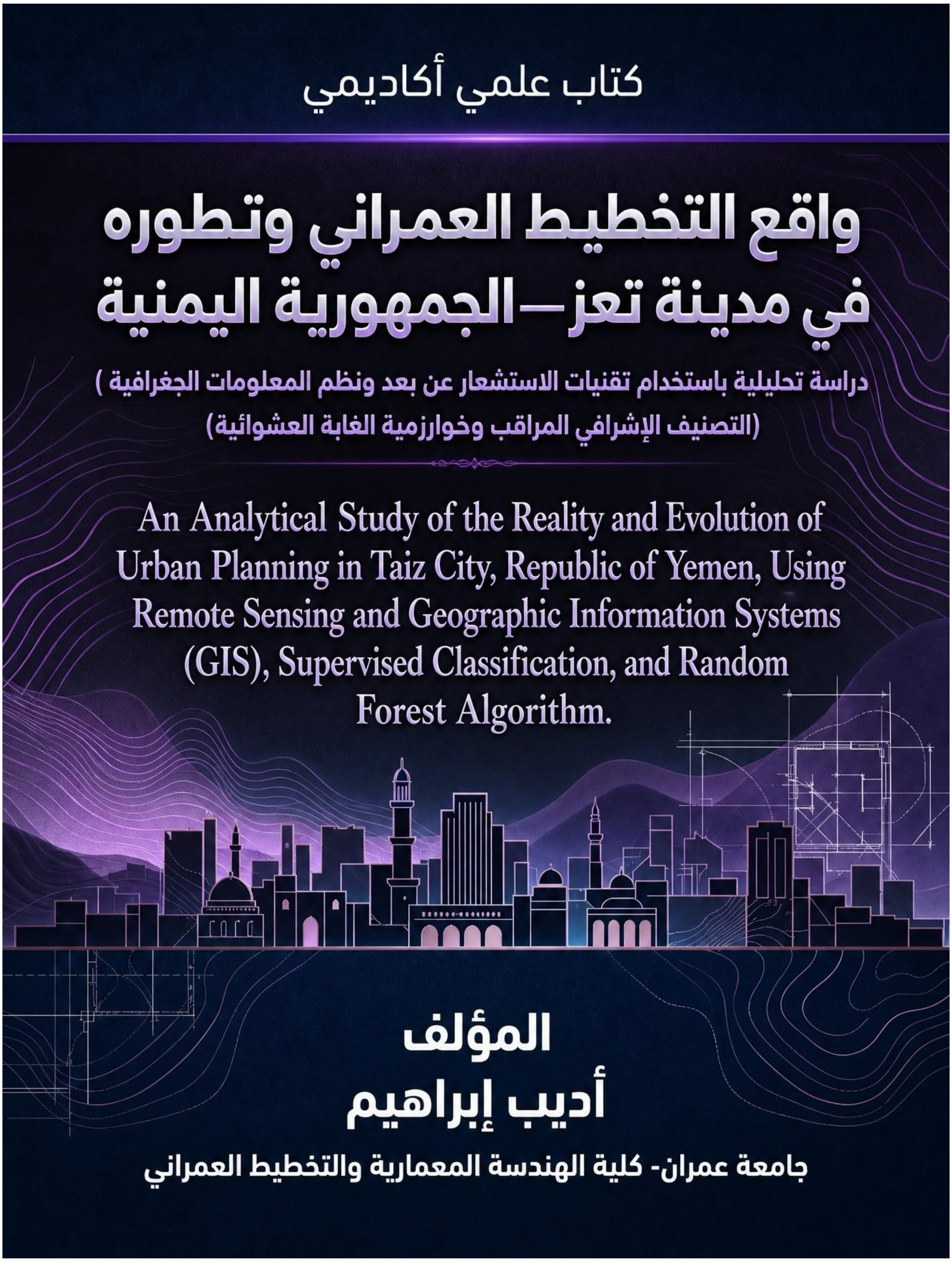


الجمهورية اليمنية

واقع التخطيط العمراني وتطوره

في مدينة تعز ــــالجمهورية اليمنية

(دراسة تحليلية باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية

(التصنيف الإشرافي المراقب وخوارزمية الغابة العشوائية

An Analytical Study of the Reality and Evolution of Urban Planning in Taiz City, Republic of Yemen, Using Remote Sensing and Geographic Information Systems (GIS), Supervised Classification, and Random Forest Algorithm.

المدينة: تعز ــــمحافظة تعز ــــ الجمهورية اليمنية.

التخصص: التخطيط العمراني. نظم المعلومات الجغرافية· الاستشعار عن بعد.

الفئة: كتاب أكاديمي متخصص محكم.

اللغة: العربية.

السنة: 202٦

المؤلف: أديب ابراهيم، قسم الهندسة المعمارية والتخطيط العمراني، جامعة عمران، اليمن.

2026

إهداء:

إلى مدينتي تعز، التي ألهمتني بجمالها الصامد والتي سوف تزال تلهمني، وبتحدياتها العميقة، لتكون منارة لهذا البحث العلمي الذي يرمي إلى مستقبل عمراني مستدام.

إلى كل روح تبذل، وما زالت تسعى، لبناء وتطوير مدننا العريقة، من مهندسين ومخططين وباحثين، الذين يحملون في قلوبهم شغف الارتقاء بمجتمعاتنا، ويؤمنون بأن العلم هو الركيزة الأساسية لتحقيق التنمية الشاملة والمأمولة.

إلى الأساتذة الأجلاء، الذين أناروا دروب معرفتنا، وزرعوا فينا حب البحث والتدقيق، فكانوا لنا خير قدوة ومعين.

وإلى الأهل والأحبة، الذين كانوا السند والعون، ومنبع الصبر والإلهام، فلهم مني خالص الشكر والامتنان وحفظهم الله بحفظه.

أهدي هذا الجهد المتواضع، وأرجو الله العلى القدير أن يكون لبنة في صرح المعرفة، ومرجعا يسهم في فهم واقع التخطيط العمراني، ويضيء الدرب نحو غد أفضل لمدننا الحبيبة الباحث. أديب ابراهيم.

تمهيد.

//بسم الله الرحمن الرحيم//

قال تعالى: ﴿ أفلم يسيروا في الأرض فتكون لهم قلوب يعقلون بها أو آذان يسمعون بها ﴾

— سورة الحج، الآية 46—

الحمد لله الذي جعل في الأرض خلائف يعمرونها وينظمون فضاءاتها، والصلاة والسلام على خاتم الأنبياء والمرسلين، سيدنا محمد وعلى آله وصحبه أجمعين.

وبعد...

الكلمة الافتتاحية

تنبثق هذه السطور من صميم اهتمام الباحث بواقع المدينة اليمنية، وما تكابده من تحولات متسارعة، وتحمل في مكوننها قراءة أكاديمية متأنية لواحدة من أعرق المدن اليمنية وأكثرها عراقة وتاريخا، ألا وهي مدينة تعز، العاصمة الثقافية لليمن، وجوهرة جبال اليمن التي طالما جمعت بين أحضانها الطبيعة الشامخة والحضارة العريقة. ويقدم هذا الكتاب بادرة علمية متعددة الأبعاد، تمزج بين عمق التحليل التاريخي وحداثة الأدوات الجيومكانية لتقييم واقعا عمرانيا بالغ التعقيد، وترسم رؤية شاملة لربع قرن من التحولات المكانية والبشرية في مدينة لا تزال تعلي صوتها في وجه العواصف.

يعد التخطيط العمراني من أرقى العلوم الإنسانية التطبيقية التي تجمع بين دقة المنهج العلمي وعمق النسيج الاجتماعي، ويرمي إلى تحقيق التوازن بين حاجات الإنسان المتنامية ومتطلبات البيئة المحيطة به. وحين نضع مدينة تعز—عروس المدائن اليمنية ومنارتها الثقافية والحضارية—في صميم هذا البحث والدراسة، فإننا نمسك بخيط رفيع وواقع مشكلات حضرية تربط الماضي الجميل بالحاضر المتأزم، ونحاول استشراف مستقبل أكثر عدالة وتوازنا يليق بقيمة المدينة ويرقى بها إلى مصاف المدن المستدامة.

تعز—المدينة التي لقبها الأجداد بـ عاصمة الثقافة اليمنية وكانت تسمى بعدينه وتسكن في قلب المرتفعات اليمنية الجنوبية الغربية، محاطة بسلاسل جبلية شامخة وأودية غنية، شكلتا معا نسيجا طبيعيا بالغ التعقيد يلقي بظلاله الثقيلة على كل قرار عمراني واجتماعي فيها. وعبر قرون متلاحقة، نسجت هذه المدينة نسيجها العمراني الخاص—من المدينة القديمة ذات الأزقة الضيقة والبيوت البرجية، إلى الأحياء الحديثة الرابضة على السفوح والوديان—لتحمل اليوم في مكنونها تناقضات حادة بين مناطق مخططة ومناطق عشوائية، وبين تراث أصيل ومتطلبات عمران معاصر.

وبالتالي، جاء هذا الكتاب استجابة لحاجة أكاديمية وعملية ملحة: وهي تقديم قراءة علمية شاملة ومحكمة وتحليل لخرائط وواقع التخطيط العمراني لمدينه تعز، مستعينا بأحدث أدوات التحليل المكاني المتاحة—في مقدمتها مرئيات القمر الصناعي سينتنل-2، وتقنيات التصنيف الإشرافي المراقب، وخوارزمية الغابة العشوائية (Random forest) التي أضحت تشكل إحدى الأدوات الأكثر موثوقية في تحليل التغيرات العمرانية واكتشاف الأنماط الخفية في البيانات الجيومكانية والمادية.

يتوجه هذا الكتاب إلى الباحثين الأكاديميين، والمخططين العمرانيين، وصناع القرار، وطلاب الدراسات العليا في تخصصات التخطيط والجغرافيا ونظم المعلومات الجغرافية، وكل من يحمل اهتماما حقيقيا بمستقبل المدن اليمنية في مرحلة إعادة البناء والتعافي المستدام والمأمول والمنشود لأجل الانسان في المقام الأول والأخير وتحسين جودة حياته. ونأمل أن يكون هذا العمل لبنة في صرح المعرفة الجغرافية العمرانية المتعلقة بمدينة تعز، وإسهاما متواضعا في مسيرة التنمية المستدامة لهذه المدينة العريقة.

:الملخص

يتناول هذا الكتاب تحليلا علميا شاملا لواقع التخطيط العمراني وتطور النسيج الحضري في مدينة تعز بالجمهورية اليمنية، معتمدا على توظيف تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية بوصفها أدوات تحليل مكانية متقدمة لدراسة التغيرات العمرانية عبر الزمن. وتركز

الدراسة على تحليل أنماط التوسع الحضري واستخدامات الأراضي خلال الفترة الممتدة بين عامي 2000 و2025، مستنيرة إلى بيانات الأقمار الصناعية متعددة الأطياف، وعلى وجه الخصوص مرئيات القمر الصناعي (Sentinel-2).

اعتمدت الدراسة على منهجية تحليلية كمية تستند على تطبيق تقنيات التصنيف الإشرافي المراقب وخوارزمية الغابة العشوائية (Random forest) لتصنيف استخدامات الأراضي واستنباط الأنماط المكانية للتغير الحضري. وقد تم استخدام مجموعة من المؤشرات الطيفية مثل NDVI وNDBI وNDWI لتحليل الغطاء النباتي والمناطق المبنية والموارد المائية، إضافة إلى دمج البيانات الطبوغرافية ونماذج الارتفاعات الرقمية في التحليل الجيومكاني.

أظهرت نتائج الدراسة أن مدينة تعز شهدت توسعا عمرانيا مطردا خلال العقدين الماضيين، حيث نمت المساحة العمرانية بشكل جلي نتيجة النمو السكاني والنزوح الداخلي وتداعيات الأزمة، الأمر الذي أدى إلى ظهور أنماط من التوسع الحضري غير النظامية واختفاء المساحات الزراعية. كما أثبتت خوارزمية الغابة العشوائية كفاءة فائقة في تصنيف استخدامات الأراضي مقارنة بأساليب التصنيف التقليدية، حيث تصل دقة التصنيف أكثر من 90% وفق مؤشرات التقييم الإحصائي.

وتخلص الدراسة إلى أهمية توظيف تقنيات الاستشعار من البعد ونظم المعلومات الجغرافية في دعم عملية التخطيط الحضري واتخاذ القرار، من خلال توفير بيانات مكانية دقيقة تسهم في فهم ديناميكيات التوسع العمراني وتحديد مناطق الإستيطان غير الرسمي، بما يدعم إعداد سياسات تخطيطية مستدامة لمدينة تعز في مرحلة إعادة الإعمار والتنمية المستقبلية.

الكلمات المفتاحية: التخطيط العمراني، التوسع الحضري، الاستشعار عن بعد، نظم المعلومات الجغرافية، استخدامات الأراضي، مدينة تعز.

Abstract:

This book presents a detailed scientific assessment of the present condition of urban planning and an assessment of how urban areas in Taiz City, Yemen, have changed through time. Advanced geospatial techniques such as remote sensing and geographic information systems (GIS) were used to evaluate the expansion of urban areas and how land use has changed over a certain period of time. This book focuses on the time period from 2005 to 2025 and uses multispectral satellite images (Sentinel-2) to observe and measure urban growth. This study's methods combine quantitative spatial analysis with supervised classification methods to classify land use and land cover categories using a random forest machine learning algorithm. Spectral indices will be calculated for each land use category to determine vegetation cover development of built-up areas and hydrological features, including the normalized difference vegetation index (NDVI), the normalized difference built-up index (NDBI), and the normalized difference water index (NDWI).

Additionally, the study will incorporate digital elevation models and other geospatial data as part of its spatial analysis. The information clearly indicates that there has been rapid urbanization and growth in Taiz City during the last 20 years as a consequence of several factors, including an increase in population, greater amounts of internal migration, and the impact of socioeconomic conditions caused by conflict. These recent geographic changes have resulted in more unplanned urban development; hence, less land devoted to agricultural uses. The study found the random forest classification algorithm performed much better than conventional methods for classifying urban growth; the overall classification accuracy obtained by each algorithm was greater than 90% when validated statistically with statistical metrics. The findings demonstrate how significant it is to develop remote sensing and geographic information systems (GIS) as support tools for evidence-based urban planning/development and decision-making processes. Remote sensing and GIS can provide accurate and up-to-date geospatial data, which is important for developing sound urban growth strategies and for effective post-conflict reconstruction efforts in urban areas such as Taiz.

Keywords: Urban planning, urban expansion, remote sensing, geographic information systems (GIS), land use , Taiz city.

فهرس المحتويات:

إهداء.......... 3

التمهيد.......... 16

الملخص.......... 17

المفاهيم الأساسية.......... 21

أهداف التخطيط العمراني.......... 22

واقع التخطيط العمراني في مدينة تعز.......... 23

تعريف نظم المعلومات الجغرافية 23

البيانات المكانية في نمذجة واقع الأرض عادة وفق نموذجين رئيسين.......... 23

خطوات إجرائية مختصرة للتصنيف الإشرافي في هذا الكتاب.......... 26

مكونات نظام المعلومات الجغرافية.......... 27

خوارزمية الغابة العشوائية 27

نماذج التصنيف.......... 28

تطبيقات GIS في دراسة تعز...28
البرامج والأدوات 29
معجم مصطلحات مختصر 30
خطوات التصنيف الإشرافي..31
مزايا الغابة العشوائية في تصنيف الصور الفضائية..32
تطبيق الغابة العشوائية في دراسة تعز..33
خلاصة الفصل الأول 33
تكامل المفاهيم وتآزر الأدوات..33
تطبيقات الاستشعار في دراسة تعز..34
أنماط التوسع العمراني في تعز...35
استحضار تعز في المنظومة المفاهيمي...39
فرضيات الدراسة...42
حدود الدراسة...42
خلاصة التطور العمراني للمدينة...63
التصنيف الإشرافي المراقب: الإجراءات...78
نتائج التصنيف الإشرافي المتوقع..79
حصاد الأرقام — ما كشفته الخرائط...80
الإنجاز التقني— التصنيف المراقب تحكم القراءة إلى منتج..82
خلاصة الفصل الثالث 83
في نهاية رحلة الخرائط...83
مبادئ خوارزمية الغابة العشوائية...84
مكونات نموذج الغابة العشوائية...85

تطبيقات خوارزمية الغابة العشوائية على مدينة تعز. 86

تحليل السلسلة الزمنية (2000 2025)..106

مؤشرات التغير المكاني والنباتي...106

التوسع العمراني: اتجاه النمو يتركز بشكل رئيسي نحو الشمال والشمال الغربي التي هي بالأصل أراضي زراعية. . . 106

الغطاء النباتي: فقدان تدريجي للمساحات الخضراء والزراعية نتيجة الزحف العمراني غير المخطط............106

المحاور الأكثر تحولا المحور الرابط بين وسط المدينة والمناطق السهلية المفتوحة..............................106

التنبؤ المستقبلي حتى عام 2030..106

المناطق المرجحة للتوسع: استمرار الزحف العمراني في النطاقات الشمالية والشرقية باتجاه منطقه الحوبان على حساب الأراضي الزراعية. 106

النطاق المكاني الذي يغطي مديريات المظفر، القاهرة، وصالة...109

التنبؤ لعام 2030: طبقة مظللة (Hatched layer) باللون البنفسجي توضح اتجاهات الزحف المتوقعة.........109

الشريط الزمني (Timeline strip)..109

بداية التوسع المنضبط حول المركز التاريخي.2000...109

امتداد طولي نحو منطقة بير باشا والحوبان.2010..109

صناديق النتائج التحليلية (Side panels)..109

تحليل التوسع العمراني: زيادة مساحة الكتلة المبنية بنسبة تقارب 185% منذ عام 2000.........................109

تراجع الغطاء النباتي بنسبة 77% في المناطق المحيطة بالكتلة الحضرية...109

المناطق الأكثر تعرضا للفقد: السفوح الشمالية والمراهق والمنحدرات لجبل صبر....................................109

صندوق مؤشر كابا ودقة التصنيف (Mandatory box)..110

مؤشر كابا ودقة التصنيف..110

مقارنة الصور المرفقة مع نقاط التحقق الأرضية المستمدة من بيانات 110

التنبؤ المستقبلي لعام 2035 (Future layer summary)..110

مناطق التوسع المرجحة: امتداد مكثف نحو مفرق جبل حبشي والمحاور الشمالية.................................110
النمذجة..110
مقدمة..112
التصنيف الإشرافي المراقب 112
اختيار عينات التدريب 113
استخلاص التوقيعات الطيفية 113
تطبيق خوارزمية التصنيف 113
تقييم الدقة 113
أمثلة على خوارزميات التصنيف الإشرافي التقليدية...113
تصنيف الاحتمالية القصوى 113
آلة المتجهات الداعمة 113
تطبيقات في التخطيط العمراني...114
رصد التوسع العمراني 114
تحديث خرائط استخدامات الأراضي 115
تقييم التغيرات البيئية 115
تحديد المناطق العشوائية 115
الغابة العشوائية 115
تعريف ومبادئ...115
تطبيقات في التخطيط العمراني...118
ملخص مقارنة بين الغابة العشوائية والتصنيف الإشرافي المراقب......................................119
استشراف الفصل السادس..120
الفصل الثامن: النتائج والمناقشة...121

النتائج الرئيسية للدراسة. 121
النتيجة البيئية الكارثية: فقدان 30% من الأراضي الزراعية 124
النتائج التقنية: دقة التصنيف ومقارنة الخوارزميات. 125
النتائج الزمنية: التحليل الديناميكي للتغير. 131
مناقشة النتائج في السياق العلمي 132
تفسير النمو العشوائي الهائل...133
المزايا المقارنة لتصنيف الغابة العشوائية 133
الاستنتاجات الرئيسية. 134
الاستنتاج التقني..134
ملخص أبرز نتائج الكتاب..140
خلاصة الفصل الثامن...140
الفصل التاسع: التوصيات والمقترحات التخطيطية...141
توصيات لتحسين التخطيط العمراني في مدينة تعز...141
دور التقنيات الجغرافية في دعم التخطيط الحضري...142
مقترحات لإدارة النمو العمراني المستقبلي...143
الخلاصة..144
القيمة العلمية والأكاديمية للكتاب..144
كلمة ختامية للمؤلف وشكر وتقدير...145
المراجع والمصادر..147
الملاحق...149

قائمة الجداول:

جدول ١: جدول تلخيصي: المفاهيم الأساسية ودورها في منظومة الدراسة.................................38

جدول ٢: حدود وقيود منطقة الدراسة..42
جدول 3. ملخص خطوات وعمل المنهجية 49
جدول ٤: تطور المساحة العمرانية في مدينة تعز...64
جدول ٥: التغير في استخدامات الأراضي..64
جدول ٦. ملخص المرئيات ودقتها ونطاقتها...65
جدول ٨: التحليل الإحصائي المقارن...76
جدول ٩: أنماط التوسع العمراني النهائي في المدينة. 79
جدول ١١: ملخص التحولات الكمية في استعمالات الأراضي...81
جدول ١٢: جدول مكونات خوارزمية الغابة العشوائية. 85
جدول ١٣: تقييم أداء النموذج ومقارنتها..85
جدول١٤: مزايا التصنيف الإشرافي المراقب...113
جدول ١٥: عيوب التصنيف الإشرافي المراقب..114
جدول 16. مزايا الغابة العشوائية..116
جدول ١٧. عيوب الغابة العشوائية..116
جدول ١٨: أبرز قدرات ومقومات التصنيفين...119
جدول 19: التغيرات الكمية في استعمالات الأراضي بين عامي 2000 و2025.....................................121
جدول 20: مقارنة دقة التصنيف بين الخوارزميات المستخدمة...125
جدول 21: ترتيب أهمية المتغيرات في نموذج الغابة العشوائية 127
جدول 23: جدول المقارنة الدراسية...132
جدول 24: مزايا خوارزمية الغابة العشوائية...134
جدول 25: مواصفات مرئية التحليل المستخدمة في التحليل المكاني...20

قائمة الاشكال:

شكل (1): نموذج تطبيقي لنظم المعلومات الجغرافية في التخطيط العمراني وتحليل استخدامات الأراضي. 22

شكل (2). يوضح مبدأ عمل الاستشعار عن بعد: رصد الأرض وجمع المعلومات عبر الأقمار الصناعية.....٢٤

شكل (3). التمثيل البصري لطبقات المعلومات في نظم المعلومات الجغرافية 26

شكل (٤). استعمالات الأراضي (2015 2020)..73

شكل (5). النطاقات الطيفية لمرئيات القمر الاصطناعي. 29

شكل (6): نتائج التصنيف الإشرافي المراقب لاستخدامات وأغطية الأراضي (LULC) من الصور الفضائية......30

شكل (7): الهيكل المعماري لخوارزمية الغابة العشوائية: أشجار قرار متعددة تجمع نتائجها بالتصويت.............32

شكل (٨): أنماط التخطيط العمراني في مدينة تعز 36

شكل (٩): أنماط التوسع العمراني في مدينة تعز..37

شكل (١٠): خريطة تظهر تحليلا مكانيا متقدما لمدينة تعز (والمناطق المحيطة بها) باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد..

شكل (١١). خطوات وتسلسل منهجية الكتاب...

شكل (١٢). موقع مدينه تعز ونظام الإحداثيات **Coordinate system** ....

شكل (١٣). خارطة مدينة تعز قبل ١٠٠ عام...

شكل (١٤). التحليل الجيومورفولوجي والمكاني لمدينة تعز......................(**Geomorphological analysis**)

شكل (15). خريطة النمو العمراني لمدينة تعز ١٩٦٠م. ....

شكل (16). خريطة التحليل المكاني الجيوسياسي Geopolitical analysis ٢٠١١-2024................٦٠

شكل (١٧). التحليل المكاني لانواع الهجرة الداخلية في مدينة تعز. 61شكل (١٨). مخططا بيانيا تحليليا متكاملا (**Infographic dashboard**)، يجمع بين الخصائص الجيومكانية والإحصائية..

شكل (١٩). يمثل هذا الشكل لوحة تحليلية جيومكانية وإحصائية **(Spatiotemporal dashboard)** تستعرض ديناميكيات التوسع العمراني في تعز..

شكل (٢٠). خريطة تحليل استعمالات الأراضي (2000-2005)..71

شكل (٢١). خريطة تحليل استعمالات الأراضي (2005-2010)..72

شكل (٢٢). خريطة تحليل استعمالات الأراضي (2010-2015)..73

شكل (٢٣). خريطة تحليل استعمالات الأراضي (2015-2020)..74

شكل (٢٤). خريطة تحليل استعمالات الأراضي (2020-2025)..75

شكل (٢٥). خرائط التوسع العمراني لمدينة تعز بين الاعوام ٢٠٠٠ و٢٠٢٥...76

شكل (٢٦). شكل يبين نسبه التغير العمراني ونسبه بصمة المباني على حساب الرقعة الزراعية. 78

شكل (٢٧). تغيرات استعمالات الأراضي في مدينة تعز خلال الفترة الممتدة بين عامي ٢٠٠٠ و ٢٠٢٥م. 82

شكل (٢٨): تصنيف جودة البيئة الحضرية في مدينة تعز..

شكل (٢٩). انماط التخطيط العمراني في مدينة تعز توزيع عينات التدريب (Training sites) في الحوض الجبلي.

شكل (٣٠). منحنى أهمية المتغيرات 89

شكل (٣٢) . تحليل شبكة الحركة وقابلة المشي. باستخدام منصة جوجل ايري انجن..............................٩٢

شكل (٣٣). خريطة، البنية التحتية الخضراء في مدينة تعز. ....

شكل (٣٤): خريطة تصنيف الغابة العشوائية لعام 2000 (خط الأساس)..

شكل (35) خريطة تصنيف عام 2010 (مرحلة الطفرة)...

شكل (٣٦). خريطة تصنيف عام 2020 (أثر النزاع والنزوح)..

شكل (٣٧). الخريطة النهائية الموحدة لعام 2025. ....

شكل (٣٨). خريطة تحليل سهولة الوصول للخدمات والمرافق في مدينة تعز...

شكل (٣٩): تحليل اتجاهات الرياح لمدينة تعز..98

شكل (٤٠). خريطة التضاريس والمرفولوجيا الحضرية لمدينة تعز وعلاقة الميول بالكثافة الحضرية..................

شكل (٤١): خرائط التحليل المكاني لخدمات الأمن في مدينة تعز..

شكل (٤2). خريطة التحليل الطبوغرافي. ....

شكل (43). تحليل مخاطر السيول والجريان السطحي لمدينة تعز...

شكل (٤٤). خريطه ارتفاعات المباني في مدينة تعز..105

شكل (٤٥). تحليل أنماط وتوزيع الإسكان في مدينة تعز...105

شكل (٤٦). خريطة التنبؤ المستقبلي لمدينة تعز لعام ٢٠٣٠..108

شكل (٤٧). خريطة التنبؤ بالتغيير المكاني والنباتي بحلول العام ٢٠٣٥ م......................................111

شكل (48). تصميم شبكة الصرف الصحي وخطوط النقل لمدينة تعز. 112

شكل (49). التغيرات في نسبة الاراضي في مدينة تعز بين 2000 و 2024..123

شكل (50). مخطط التدفق الانتقالي لاستعمالات الاراضي بين 2000 و 2024...125

شكل (51). تطور التركيب العمراني في مدينة تعز 2000 و2024...126

شكل (52). خريطة التوسع الحلقي ونسبة العشوائيات..128

شكل (53). شكل تراكب الانحدارات وتركز العشوائيات والمخاطر..128

شكل (54). محاور النمو العمراني الخطي لمدينة تعز..130

شكل (55). المقارنة الرادارية لخوارزمية التصنيف...132

شكل (56). ترتيب اهمية المتغيرات في نماذج الغابة العشوائية..135

شكل (57) منحني التعلم لنماذج الغابة العشوائية..135

شكل (58). مصفوفه الارتباك الحرارية لنماذج الغابة العشوائية..136

شكل (59). التسلسل الزمني للتوسع العمراني والتغيرات الكمية لمدينة تعز بين 2000 و 2024 وصافي التغيير والاتجاه...137

شكل (60). اختلال التوازن العمراني بمدينة تعز (الهرم المقلوب)..138

شكل 61. لوحة المعلومات لتحليلات الشامة لنتائج الدراسة...139

شكل (62). سيناريوهات التوسع المستقبلي لمدينة تعز 2035..139

شكل (63). خريطة التخطيط المكاني لشبكة الصرف الصحي لمدينة تعز...168

شكل (64). مرئية مدينة تعز المستخدمة في عملية التحليل والحساب في الكتاب دقة 10 م. 172

الاختصارات:

الرمز	الاختصار بالإنجليزية	الاختصار بالعربية
GIS	Geographic Information Systems	نظم المعلومات الجغرافية
RS	Remote Sensing	الاستشعار عن بعد
LULC	Land Use and Land Cover	استخدامات وأغطية الأراضي
RF	Random Forest	خوارزمية الغابة العشوائية
SVM	Support Vector Machine	آلة متجهات الدعم
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	مؤشر الفرق المعياري للغطاء النباتي
NDBI	Normalized Difference Built-up Index	مؤشر الفرق المعياري للمناطق المبنية
NDWI	Normalized Difference Water Index	مؤشر الفرق المعياري للمياه
UI	Urban Index	مؤشر التحضر
DEM	Digital Elevation Model	نموذج الارتفاعات الرقمية
MSI	MultiSpectral Instrument	المستشعر متعدد الأطياف
ESA	European Space Agency	وكالة الفضاء الأوروبية
OOB	OutofBag Error	خطأ خارج العينة
OA	Overall Accuracy	الدقة الكلية
Kappa	Kappa Coefficient	معامل كابا

خاطرة)إن المدينة بالإضافة إلى كونها نسيج من المبان والطرق، فهي في الاساس تتمثل بمثابة أرواح تسكنها وذاكرة تحملها وحلم تنسجه(ـــمن وحي مدينة تعز.

الفصل الأول: المقدمة والتعاريف العامة والمفاهيم الأساسية والأدوات التقنية المستخدمة.

١.١ مقدمة وتوطئة:

شهد العالم في الآونة الأخيرة تحولات حضرية متسارعة نتيجة للنمو السكاني المتزايد والتوسع العمراني المطرد، الأمر الذي أدى إلى ظهور العديد من التحديات التخطيطية والبيئية والاقتصادية في المدن، خاصة في الدول النامية الموسومة بدول العالم الجنوبي منها مدينه تعز محور الدراسة. وقد أضحت دراسة التحليل العمراني للمدن احد أهم الموضوعات الحيوية في مجالات التخطيط الحضري والجغرافيا الحضرية ونظم المعلومات الجغرافية، لما لها من دور بارز في فهم ديناميكيات النموالعمراني والتغير في استخدامات الأراضي، بالإضافة إلى دعم متخذي القرار في وضع الخطط التنموية المستدامة القائمة والمستنيرة على الأدلة التحليلية العمليه والآنية.

ويعد التحليل العمراني أحد الأدوات العلمية التي تهدف إلى دراسة بنية المدينة وتطورها المكاني والزمني، من خلال تحليل أنماط التوسع الحضري والتغيرات في استخدامات الأراضي، والكشف عن العوامل المؤثرة في النمو العمراني. وقد تطورت أساليب التحليل العمراني بشكل كبير مع التقدم التكنولوجي، حيث أصبح من الممكن استخدام تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية في رصد وتحليل التغيرات المكانية بدقة عالية وبتكاليف أقل مقارنة بالأساليب التقليدية.

و من هذا السياق، برزت أهمية استخدام صور الأقمار الصناعية في دراسة التوسع الحضري والتغيرات في الغطاء الأرضي، حيث توفر هذه الصور بيانات مكانية وزمانية تسهم في تتبع التحولات العمرانية عبر فترات زمنية مختلفة. كما ساهم التطور في تقنيات تحليل الصور الفضائية في تحسين دقة تصنيف استخدامات الأراضي، وذلك من خلال استخدام خوارزميات التصنيف المختلفة، سواء التقليدية منها أو المعتمدة على تقنيات تعلم الآلة منها التصنيف الإشرافي المراقب (Support vector machine) وتصنيف الغابة العشوائية (Random forest classification) المستهدف في هذه الدراسة بالدرجة الاولى.

ومن بين هذه التقنيات الحديثة تبرز خوارزميات تعلم الآلة، التي أصبحت أداة فعالة في تحليل البيانات الجغرافية المكانية. ومن أهم هذه الخوارزميات: خوارزمية الغابة العشوائية، (Random forest) التي تعد من أكثر خوارزميات التصنيف كفاءة في معالجة البيانات المعقدة، حيث تعتمد على بناء عدد كبير من أشجار القرار ومن ثم دمج نتائجها للحصول على تصنيف أكثر دقة واستقرارا. وقد أثبتت هذه الخوارزمية قدرتها العالية في تصنيف الغطاء الأرضي واستخدامات الأراضي عند تحليل صور الأقمار الصناعية.

وتعد مدينة تعز من المدن اليمنية المهمة التي شهدت خلال العقود الماضية توسعا عمرانيا ملحوظا نتيجة للزيادة السكانية والهجرة الداخلية والتطور الاقتصادي النسبي، الأمر الذي أدى إلى

تغيرات واضحة في أنماط استخدامات الأراضي داخل المدينة ومحيطها. كما أن موقع المدينة الجغرافي وطبيعتها الطبوغرافية الخاصة جعلا من عملية التخطيط العمراني فيها تحديا كبيرا يتطلب استخدام أدوات تحليلية متقدمة لفهم اتجاهات النمو العمراني وإدارته بشكل فعال.

ومن هنا تتجلى أهمية هذه الدراسة التي تهدف إلى تحليل التوسع العمراني في مدينة تعز باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية، مع تطبيق أساليب التصنيف الإشرافي المراقب وخوارزمية الغابة العشوائية على صور الأقمار الصناعية، وذلك، من أجل الكشف عن التغيرات العمرانية التي شهدتها المدينة خلال فترات زمنية مختلفة، وتقييم واقع التخطيط العمراني فيها.

وتتمثل مشكلة الدراسة في أن مدينة تعز شهدت خلال السنوات الماضية توسعا عمرانيا متسارعا وغير منظم في بعض الأحيان حيث اشارت الدراسات مثل (UN habitat) ان نسبه التخطيط المنظم يمثل فقط ٢٥% فقط من المدينه، الأمر الذي أدى إلى ظهور العديد من المشكلات الحضرية مثل انتشار المناطق العشوائية، والضغط على البنية التحتية، وتراجع المساحات الزراعية والمفتوحة. وعلى ضوء ما سبق فإن تحليل هذا التوسع العمراني باستخدام تقنيات حديثة يمكن أن يسهم في فهم أبعاد المشكلة وتقديم حلول تخطيطية مناسبة.

وتهدف هذه الدراسة إلى تحقيق مجموعة من الأهداف التي سوف يتم تفصيلها لاحقا-بإذن الله تعالى وتوفيقه، ولعلا، من أبرزها تحليل التغيرات في استخدامات الأراضي في مدينة تعز، وتحديد اتجاهات التوسع العمراني، وتقييم كفاءة استخدام تقنيات التصنيف المختلفة في تحليل الصور الفضائية، إضافة إلى تقديم مجموعة من التوصيات التي يمكن أن تسهم في تحسين عملية التخطيط العمراني في المدينة.

كما تكتسب هذه الدراسة أهميتها من كونها تسهم في توظيف التقنيات الحديثة في خدمة الدراسات العمرانية، وتقدم نموذجا تطبيقيا يمكن الاستفادة منه في دراسة المدن اليمنية الأخرى التي تعاني من مشكلات عمرانية مشابهة.

وبناء على ذلك، تم تقسيم هذا الكتاب إلى مجموعة من الفصول التي تتناول منهجية مختلطة كمية وكيفية تتمثل بالإطار النظري للتحليل العمراني، وخصائص مدينة تعز الجغرافية والعمرانية، إضافة إلى منهجية البحث المعتمدة في تحليل البيانات، وتطبيق تقنيات التصنيف المختلفة على صور الأقمار الصناعية، وصولا إلى عرض نتائج التحليل ومناقشتها، ثم الوصول إلى الهدف الأسمى والمنشود باستشراف وتقديم مجموعة من الاستنتاجات والتوصيات التي يمكن أن تسهم في دعم عملية التخطيط الحضري المستدام في مدينة تعز بشكل خاص والمدن اليمنية بشكل عام.

١.٢: المفاهيم الأساسية

يهدف هذا الفصل بشكل جلي إلى ضبط الإطار المفاهيمي والمصطلحي للكتاب، وتحديد المعاني الهندسية والتخطيط للمفاهيم الرئيسة المرتبطة بالتخطيط العمراني، والاستشعار عن بعد، ونظم المعلومات الجغرافية، وتقنيات التصنيف الإشرافي المراقب وخوارزمية الغابة العشوائية، إضافة إلى التعريف بالبرامج والأدوات التقنية المستخدمة في جمع البيانات ومعالجتها وتحليلها وإخراج الخرائط وذلك كالتالي:

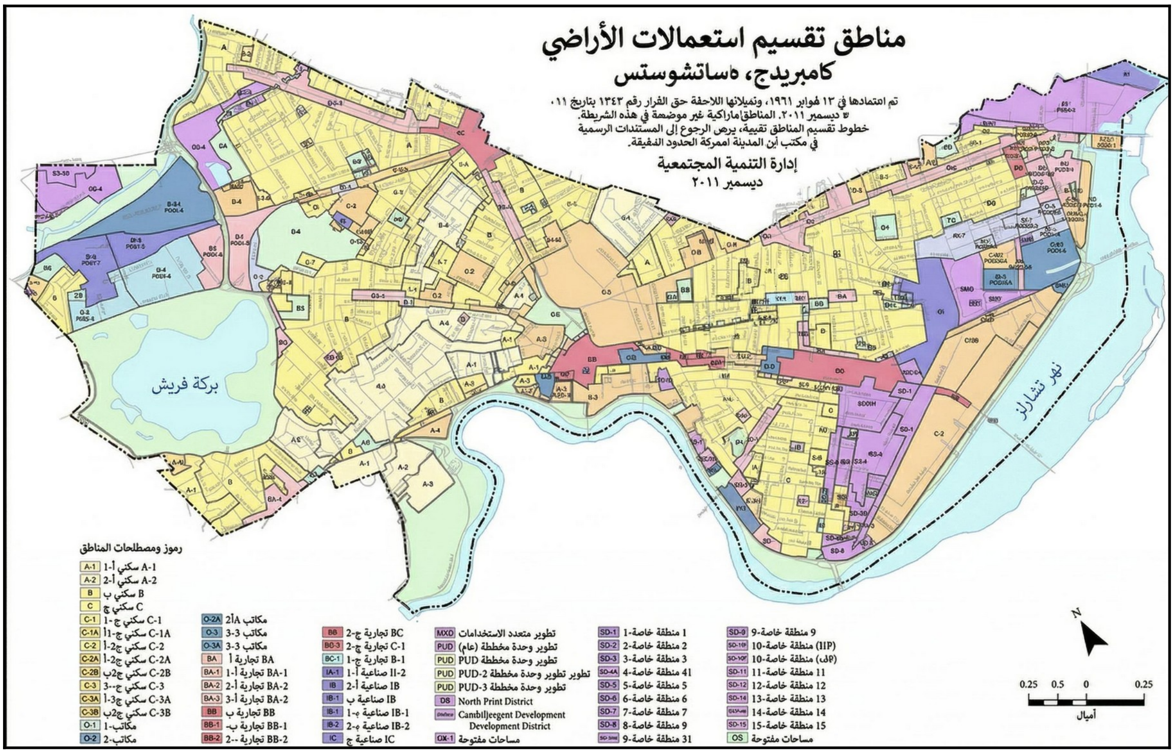
أولا: مفهوم التخطيط العمراني: (Urban planning/urban and territorial planning)

يستخدم مصطلح التخطيط العمراني في هذا الكتاب للدلالة على عملية مؤسسية موجهة لاتخاذ القرار والذي يعني بتوجيه التنمية المكانية وإدارة استعمالات الأرض وتوزيع الأنشطة والخدمات والبنى التحتية بحيث يحقق أهدافا اقتصادية واجتماعية وثقافية وبيئية.

وايضا من جانب آخر تؤكد الأدبيات الأممية أن التخطيط الحضري/الإقليمي: هو عملية صنع القرار تهدف إلى تحقيق أهداف اقتصادية واجتماعية وثقافية وبيئية من خلال تطوير الرؤى والاستراتيجيات والخطط المكانية، وتنسيق السياسات والاستثمارات المناسبة للمكان.

كما يمكن استنباط التعريف الامثل للتخطيط: بأنه تحقيق هدف معين في فتره زمنيه معينه لمجموعه معينه من الفئات. استنباط الباحث بالاعتماد على عدد من التعاريف. (UNHabitat, International Guidelines on Urban and Territorial Planning (IGUTP).

تعريف آخر التخطيط العمراني: هو منظومة من الإجراءات التحليلية والتنظيمية التي تبدأ بتشخيص الواقع المكاني للمدينة)، البنية الحضرية استعمالات الأرض، النمو والتوسع، القيود البيئية (ثم صياغة بدائل مكانية، وانتهاءا بإقرار سياسات وبرامج تنفيذية وآليات متسلسلة؛ مستنيرة إلى بيانات مكانية قابلة للقياس والتحقق خرائط، مرئيات فضائية، قواعد وبيانات (GIS).



شكل (1): نموذج تطبيقي لنظم المعلومات الجغرافية في التخطيط العمراني وتحليل استخدامات الأراضي. المصدر: (Geography Realm—GIS in Urban Planning (2024.

ويعرف أيضا بالتخطيط الحضري أو تخطيط المدن)erritorial planning(t هو منظومة متكاملة من الإجراءات التحليلية والتنظيمية والتشريعية، تستهدف توجيه النمو المكاني للمدن والتجمعات البشرية، وإدارة استخدامات الأراضي بصورة رشيدة، وتوزيع الأنشطة الاقتصادية والخدمات والبنية التحتية لتحقيق التنمية المستدامة والمتوازن (UN-Habitat, 2015 .)

1.2 أهداف التخطيط العمراني:

يتركز التخطيط العمراني حول عدد من الأهداف الاستراتيجية المترابطة، يمكن الاشارة الى أبرزها من خلال الأهداف التالية:

(أ) تعزيز جودة البيئة الحضرية وتحسين معيشة السكان.

(ب) التوزيع العادل للخدمات والبنية التحتية.

(ج) الحد من التوسع العشوائي غير المخطط.

(د) صون الموارد الطبيعية والتراث التاريخي.

(هـ) تهيئة بيئة ملائمة للتنمية الاقتصادية المستدامة.

واقع التخطيط العمراني في مدينة تعز 1.3:

تكشف البيانات الفضائية والميدانية أن 25% فقط من المدينة يخضع للتخطيط الرسمي المنظم، في حين يعاني الجزء الأكبر من نمو عشوائي متسارع؛ إذ ارتفعت المساحة العمرانية من نحو 18 كم² عام 2000 إلى ما يزيد على 46 كم² عام 2024، بمعدل توسع سنوي بلغ ما يقارب 3.8%، الأمر الذي شكل ضغطا هائلا على الموارد والبنية التحتية.

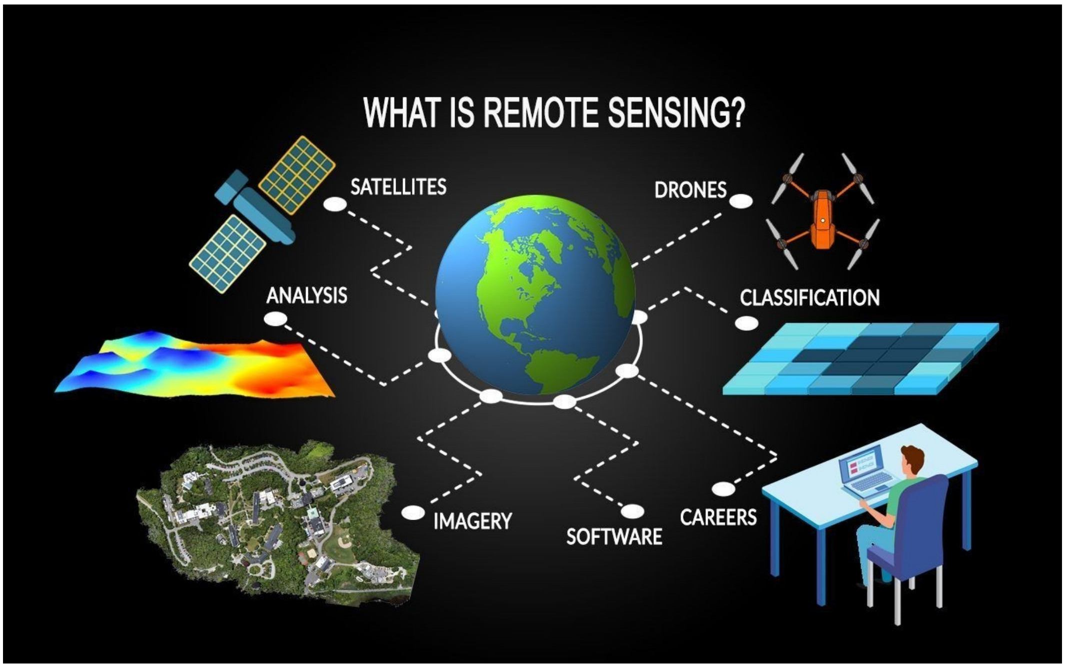
ثانيا: تعريف نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والبيانات المكانية:

نظم المعلومات الجغرافية(GIS): هي تكنولوجيا/نظام تستخدم لإنشاء البيانات المكانية وإدارتها وتحليلها وتمثيلها خرائطيا، عبر ربط البيانات الوصفية بالموقع الجغرافي بالبيانات المكانية،(Esri.What is GIS) الأمر الذي يسمح بفهم الأنماط والعلاقات المكانية ودعم اتخاذ القرار. وتعرفها بعض الجهات العلمية ايضا: بوصفها نظاما حاسوبيا لتحليل وعرض المعلومات المرجعية مكانيا (USGS–What is a geographic information system (GIS)?)

البيانات المكانية في نمذجة واقع الأرض عادة وفق نموذجين رئيسين:

1 - البيانات النقطية (Raster) وتمثل الظواهر على هيئة خلايا/بكسلات (ومنها الصور الفضائية.

٢- و البيانات المتجهة (Vector) وتمثل المعالم على هيئة نقاط وخطوط ومضلعات. وتعد مكتبة GDAL مرجعا تقنيا أساسيا في عالم التعامل مع صيغ البيانات الجغرافية النقطية والمتجهه. (GDAL Documentation–GDAL is a translator library for raster and vector geospatial data formats).



شكل (2). يوضح مبدأ عمل الاستشعار عن بعد: رصد الأرض وجمع المعلومات عبر الأقمار الصناعية. المصدر: **.2024 .GIS Geography—Remote Sensing: The Definitive Guide**

2.1 التعريف الاصطلاحي:

الاستشعار عن بعد (Remote sensing):(هو علم وتقنية وفن الحصول على معلومات دقيقة عن الأجسام والظواهر الطبيعية والبشرية على سطح الأرض، دون الحاجة إلى تماس مادي مباشر معها، وذلك عن طريق قياس وتسجيل الإشعاع الكهرومغناطيسي المنعكس أو المنبعث من سطح الأرض، باستخدام مستشعرات إلكترونية متطورة محمولة على الأقمار الصناعية أو الطـائرات المسيرة (الدرونز). (Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J, 2015).

ثالثا: الاستشعار عن بعد او من البعد (Remote sensing) ومرئيات Sentinel-2:

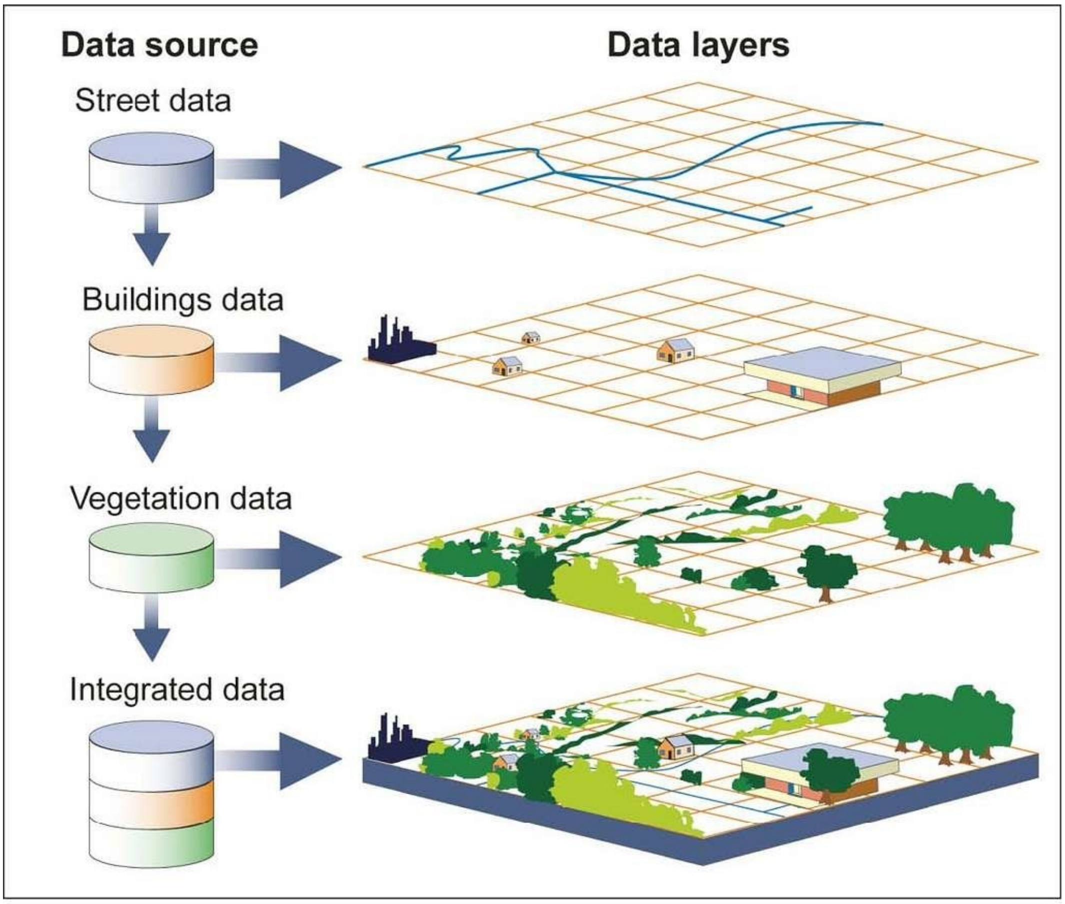
الاستشعار عن بعد أو من البعد: هو علم وفن وتقنية الحصول على معلومات عن الأجسام والظواهر من مسافة، من دون اتصال مباشر، وذلك بقياس الإشعاع المنعكس أو المنبعث (وأحيانا المتشتت) من سطح الأرض بواسطة مستشعرات محمولة على منصات فضائية أو جوية. ويعد هذا التعريف أساسيا لأنه يربط (المعلومة) بطيف الطاقة الكهرومغناطيسية وبآليات القياس والتحويل إلى بيانات رقمية قابلة للتحليل (2012 .Drusch, M., et al).

وفي هذا الكتاب تستخدم مرئيات 2Sentinel- المستشعرMSI بوصفها مصدرا رئيسا للبيانات متعددة الأطياف، إذ تسجل 13 نطاقا طيفيا (Spectral bands) بدقات مكانية مختلفة (102060)

بما يدعم تمييز الغطاء الاستعمال الأرضي ورصد التغيرات عبر الزمن. (Copernicus Data Space–2 Sentinel documentation).

مصطلحات طيفية/مكانية أساسية مرتبطة بمرئيات Sentinel–2:

- الدقة المكانية (Spatial resolution): مساحة الأرض التي يمثلها البكسل.
- الدقة الطيفية (Spectral resolution): عدد النطاقات الطيفية وعرض كل نطاق.
- الدقة الزمنية Temporal resolution: معدل تكرار مرور القمر فوق الموقع. (NASA Earth Observatory–Remote Sensing)
- الدقة الإشعاعية Radiometric resolution: عدد مستويات القياس عمق البت التي تمثل شدة الإشعاع.



Source: GAO.

شكل (3). التمثيل البصري لطبقات المعلومات في نظم المعلومات الجغرافية (GIS Thematic Layers)

المصدر: PICRYL—Visual Representation of Themes in a GIS.

3.1 التعريف الجامع: نظم المعلومات الجغرافية:

(Geographic Information Systems—GIS): هي منهج تكنولوجي ومنهجي متكامل يستخدم لإنشاء البيانات المكانية وتخزينها وإدارتها وتحليلها وعرضها بصريا، من خلال ربط المعلومات الوصفية (Attribute data) بالمواقع الجغرافية الدقيقة على سطح الأرض، بما يتيح فهم الأنماط والعلاقات المكانية، ودعم اتخاذ القرارات في شتى مجالات التخطيط والبيئة والتنمية. (United States Geological Survey (USGS).

رابعا: التصنيف الإشرافي المراقب (Supervised classification)

التصنيف الإشرافي المراقب: هو منهج في معالجة صور الاستشعار عن بعد يقوم على تدريب مصنف (Classifier) باستخدام عينات تدريبية (training samples) ذات فئات مدربة مسبقا مثل عمران، زراعة، ماء، أرض جرداء، ثم تعميم النموذج المتعلم لإسناد الفئة الأكثر احتمالا لكل بكسل/كائن في الصورة، ويفهم هذا التصنيف باعتباره تعلما خاضعا لإشراف بيانات مرجعية يحددها الباحث، بما يجعل جودة العينات التدريبية، وتمثيلها للفئات وتوازنها، من محددات الدقة النهائية (Google Earth Engine Developers–Supervised Classification Guide).Richards & Jia–Remote Sensing Digital Image Analysis)

خطوات إجرائية مختصرة للتصنيف الإشرافي في هذا الكتاب:

- تحديد هدف التصنيف ونظام الفئات (LULC) ومعايير التمييز بين الفئات.
- المعالجة المسبقة :(Preprocessing) مثل التصحيح الجوي/الإشعاعي، اقتصاص منطقة الدراسة، توحيد الدقة المكانية.
- بناء بيانات التدريب والتحقق اختيار العينات، ترميزها، تقسيمها إلى تدريب/تحقق.
- استخراج السمات (Features): نطاقات طيفية، مؤشرات مثل (NDVI)، و سمات نسيجية بحسب الغرض.
- تدريب المصنف وضبط المعاملات ثم إنتاج خريطة التصنيف.
- تقييم الدقة (Accuracy assessment) باستخدام مصفوفة الخطأ ومؤشرات الدقة (مؤشر كابا).

3.2 مكونات نظام المعلومات الجغرافية:

يتألف نظام المعلومات الجغرافية من خمسة مكونات متكاملة لا يكتمل النظام إلا بتوافرها:

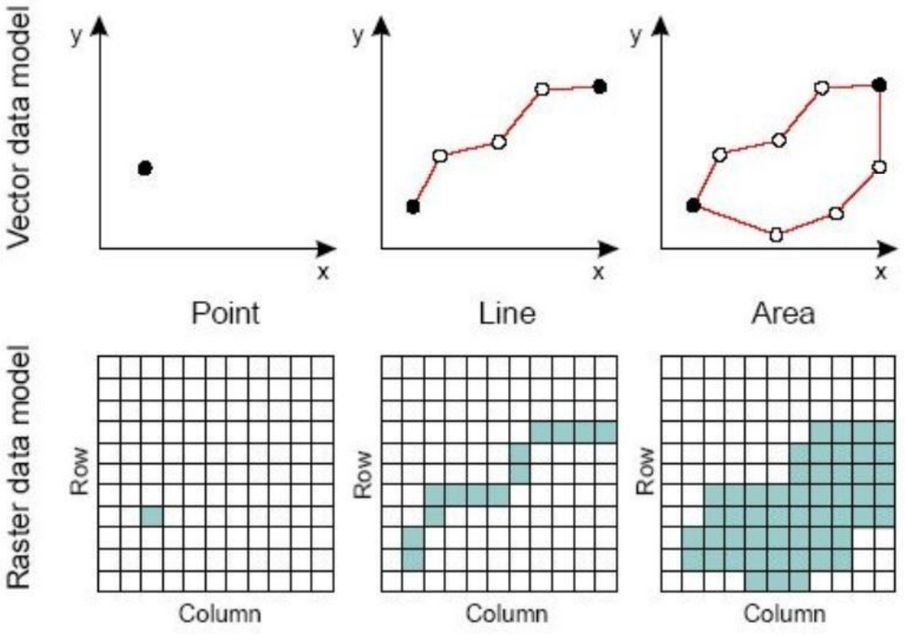
1) العتاد (Hardware): الأجهزة والحواسيب وأدوات الإدخال والإخراج.

2) البرمجيات (Software): تطبيقات متخصصة كـ QGIS وArcGIS و Google Earth Engine.

3) البيانات (Data): المدخلات الجوهرية بنموذجيها الشبكي (Raster) والاتجاهي (Vector).

4) الأساليب والنماذج Methods: الخوارزميات والإجراءات التحليلية المكانية.

5) المستخدم والإدارة (People and management): الكوادر البشرية المؤهلة وآليات حوكمة البيانات. (Belgiu &) Drăguţ (2016)–Semantic Scholar.



شكل (4). مقارنة نموذجي البيانات في نظم المعلومات الجغرافية: الشبكي (*Raster*) والاتجاهي (*Vector*)

المصدر: (World Bank) Geographic Data and Services Guide.)

خامسا: خوارزمية الغابة العشوائية (Random forest):

الغابة العشوائية خوارزمية تعلم آلة تجميعية (Ensemble) تقوم على بناء عدد كبير من أشجار القرار على عينات Bootstrap من بيانات التدريب، مع إدخال عشوائية إضافية عند اختيار مجموعة الخصائص المرشحة في كل انقسام، ثم تدمج مخرجات الأشجار بالأغلبية في التصنيف لتحسين الاستقرار وتقليل فرط المواءمة (Overfitting) أو التحيز(Breiman, L. (2001). Random Forests).

مصطلحات تقنية مرتبطة بالغابة العشوائية:

- Bagging: تجميع نماذج مبني على عينات Bootstrap.

OutofBag (OOB) Error: تقدير داخلي للخطأ باستخدام مشاهدات أو ظواهر لم يتم استخدامها في تدريب بعض أشجار القرار.

- Feature importance تقدير مساهمة كل متغير في تحسين قدرة النموذج على التمييز بين الفئات.

1.3.3نماذج البيانات المكانية:

تصنف البيانات المكانية في نظم المعلومات الجغرافية وفق نموذجين رئيسيين:

أ) النموذج الشبكي (Raster data mogel):

يمثل الظواهر المكانية على هيئة شبكة منتظمة من الخلايا (بكسلات)، تحمل كل منها قيمة رقمية تعكس خاصية معينة (كارتفاع التضاريس، أو درجة الحرارة، أو الانعكاسية الطيفية). وتعد المرئية الفضائية المثال الأبرز على هذا النموذج.

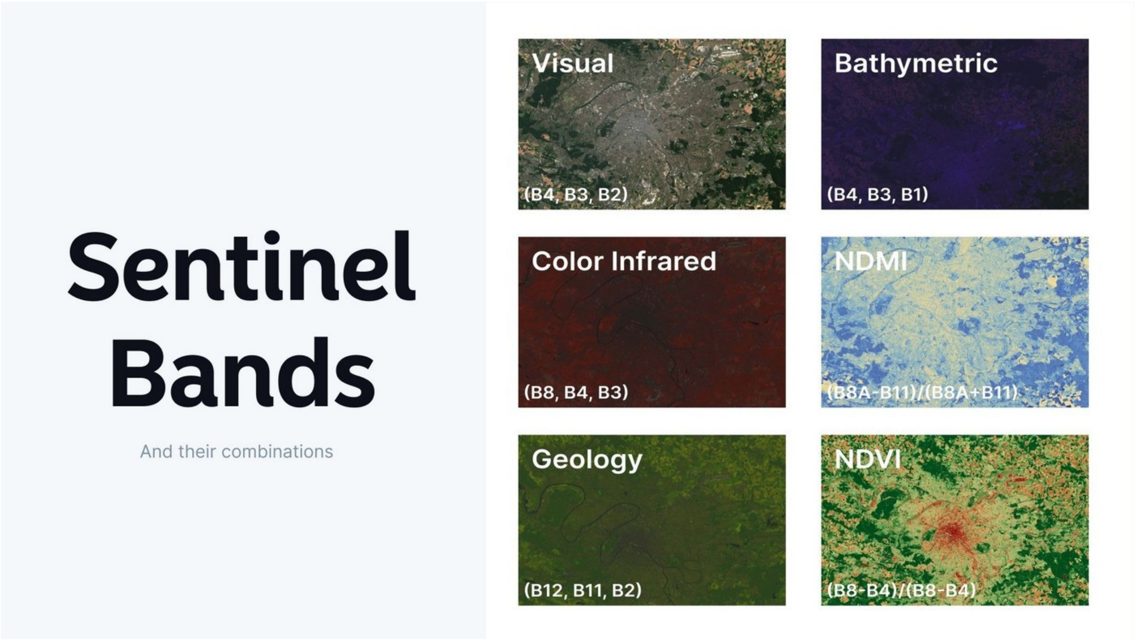
ب) النموذج الاتجاهي (Vector data model):

يمثل المعالم الجغرافية بثلاثة أشكال هندسية: النقاط (للمواقع كالمحطات)، والخطوط (للشبكات كالطرق والأنهار)، والمضلعات (للمناطق كحدود الأحياء وقطع الأراضي).

1.3.4 تطبيقات GIS في دراسة تعز:

وظفت نظم المعلومات الجغرافية في هذه الدراسة لتحقيق جملة من الأهداف التحليلية، من أبرزها:

- إنشاء خرائط استخدامات الأراضي (LULC) للفترات 2005 و2015 و2025.
- تحليل التغيرات المكانية ورصد اتجاهات التوسع العمراني.
- تطبيق المؤشرات الطيفية (NDVI، NDBI، NDWI، and UI) لوصف المكونات البيئية والعمرانية.
- دمج بيانات التضاريس الرقمية(DEM) مع الطبقات الموضوعية للتحليل المكاني المتكامل.



شكل (5). النطاقات الطيفية لمرئيات القمر الاصطناعي. *Sentinel-2L-2* مع الدقة المكانية لكل نطاق

المصدر: Blogs FUBerlin— Sentinel-2 Spectral Bands Overview

سادسا: البرامج والأدوات QGIS:

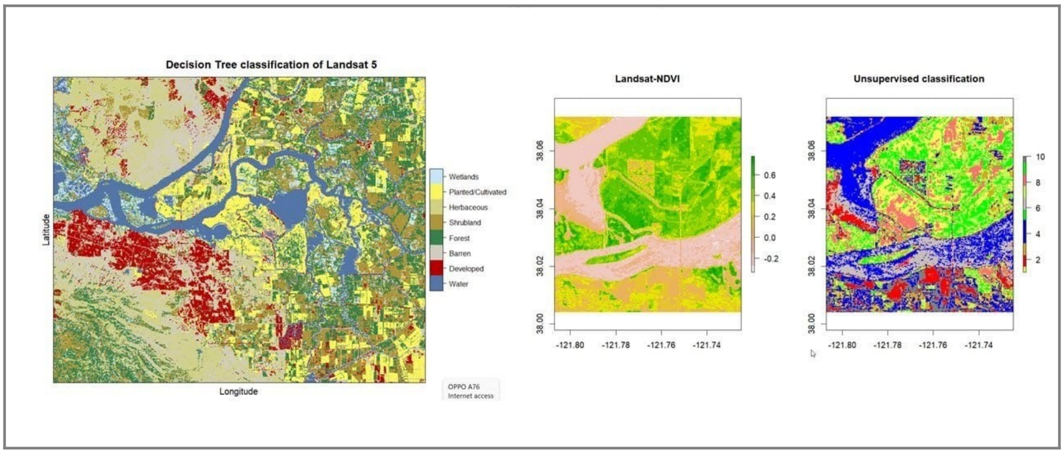
نظام معلومات جغرافي حر ومفتوح المصدر يستخدم لتحرير البيانات المكانية الكمومية وتحليلها وتمثيلها خرائطيا، وإجراء المعالجات الجغرافية (Geoprocessing) وبناء الخرائط النهائية .(ESA SNAP)

SNAP منصة طورتها وكالة الفضاء الأوروبية لمعالجة بيانات مرئيات Sentinel-2، وتستخدم في التحضير المسبق لمرئيات Sentinel-2 (قراءة المنتجات، دمج النطاقات، بعض التصحيحات، وإعداد البيانات للتحليل).

(Google Earth Engine): هي منصة حوسبة سحابية للبيانات الجغرافية تمكن الباحث من استدعاء أرشيفات مرئيات عالمية ومنها (Sentinel-2) وتنفيذ خوارزميات التصنيف والتحليل مكانيا وزمانيا على نطاق واسع دون الحاجة إلى تنزيل البيانات محليا، مع دعم مصنفات متعددة ومنها Random forest. GDAL (https://gdal.org/))

GDAL مكتبة/حزمة أدوات معيارية لمعالجة صيغ البيانات الجغرافية النقطية والمتجهة قراءة وكتابة وتحولا، وتعد حجر أساس في عمليات القص وإعادة الإسقاط وإعادة التشكيل والتحويل بين الصيغ.

Python لغة برمجة واسعة الاستخدام في التحليل المكاني وتعلم الآلة. ويستخدم scikit-learn، لتطبيق خوارزميات التعلم الإشرافي—including random forest—وضبط المعاملات والتحقق وقياس الدقة. (Python + scikit-learn)



شكل (6): نتائج التصنيف الإشرافي المراقب لاستخدامات وأغطية الأراضي (LULC) من الصور الفضائية. المصدر: (Land Use and Land Cover Classification)2024

سابعا: معجم مصطلحات مختصر (Glossary):

- استعمالات/أغطية الأرض (LULC): تمييز بين نمط الاستعمال البشري للأرض وبين الغطاء الفيزيائي السائد على سطحها.
- المعالجة المسبقة (Preprocessing): عمليات تهيئة البيانات قبل التحليل (تصحيح، اقتصاص، توحيد دقة، إزالة غيوم.
- التصحيح الجوي (Atmospheric correction): تقليل أثر الغلاف الجوي على الإشارة الطيفية للوصول إلى انعكاس سطحي أقرب للواقع وقد تمت المعالجة للوصول إلى نسبة مقبولة للتحليلات الأكاديمية ٩%.
- العينات التدريبية (Training samples): عينات مرجعية ممثلة للفئات تستخدم للتعليم المصنف.
- التحقق الميداني (Ground truth): بيانات مرجعية تجمع ميدانيا أو من مصادر عالية الدقة للتحقق من نتائج التصنيف.
- الدقة الكلية (Overall accuracy): نسبة العناصر المدربة صحيحا إلى إجمالي عناصر التحقيق.

مخطط سير عملية التصنيف الإشرافي:

التصنيف الإشرافي المراقب (Supervised classification): هو منهجية حاسوبية لمعالجة الصور الفضائية، تقوم على تدريب نموذج تعلم آلي (Classifier model) باستخدام وتدريب مجموعة من العينات التدريبية المعروفة الهوية (Training samples/ROIs)، تمثل فئات محددة مسبقا كالمناطق العمرانية والغطاء الزراعي والمسطحات المائية والأراضي القاحلة، ثم تعميم النموذج المدرب على كامل الصورة لتصنيف كل بكسل ضمن الفئة الأنسب له (Richards, J. A., & Jia, X. (2006) .

خطوات التصنيف الإشرافي ١.5.2:

تتسلسل خطوات التصنيف الإشرافي وفق منهجية إجرائية محكمة:

① جمع العينات التدريبية (ROIs collection) من مصادر الحقيقة الميدانية والصور عالية الدقة.

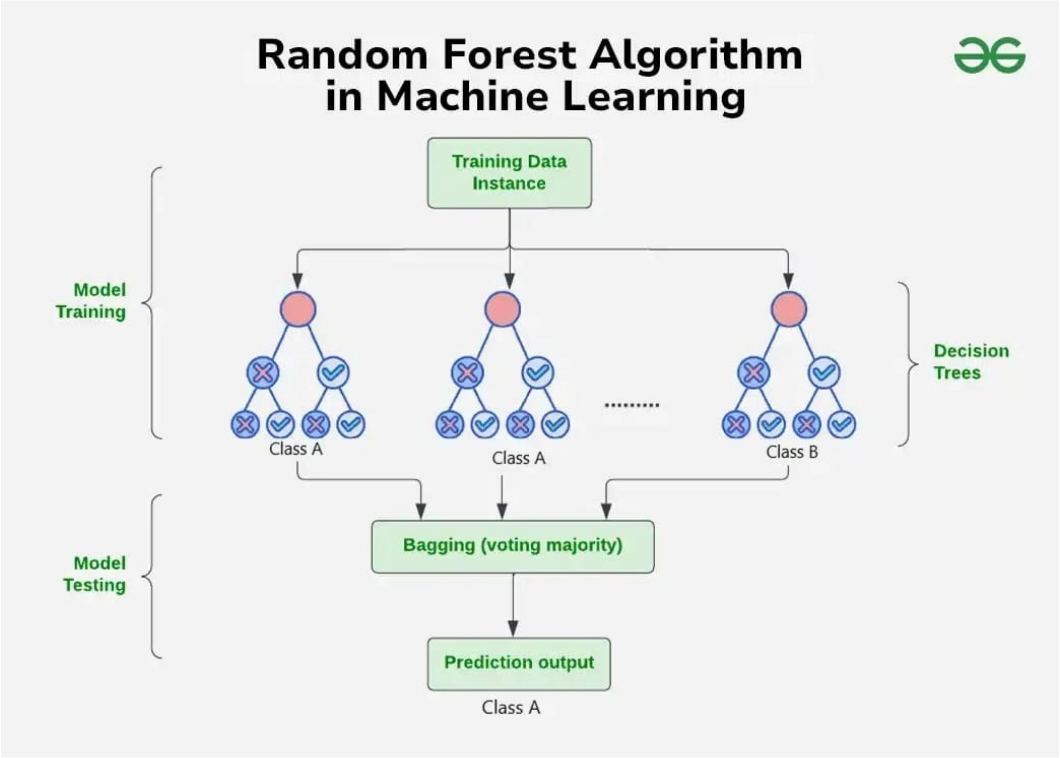
② اختبار الفصل الطيفي بين الفئات بمؤشر JeffriesMatusita أو Transformed Divergence.

③ تطبيق خوارزمية التصنيف (Maximum Likelihood/ SVM/Random forest).

④ إنتاج خريطة التصنيف الأولية.

⑤ التحقق الميداني (Ground truthing) ومقارنة النتائج بالواقع.

⑥ تقييم الدقة الإحصائية بمصفوفة الخطأ ومعامل كابا (Kappa coefficient).



شكل (7): الهيكل المعماري لخوارزمية الغابة العشوائية: أشجار قرار متعددة تجمع نتائجها بالتصويت. المصدر: GeeksforGeeks—Random Forest Algorithm in Machine Learning (2024)

6.1 التعريف الاصطلاحي:

خوارزمية الغابة العشوائية (Random forest—RF) هي أسلوب تعلمي تجميعي (Ensemble learning method) مصنف ضمن خوارزميات تعلم الآلة المشرف عليها (supervised Machine learning)، طورها العالم ليو بريمان (Leo Breiman) عام 2001 في مختبرات جامعة كاليفورنيا بيركلي. تعتمد الخوارزمية على بناء مئات أو آلاف أشجار القرار (Decision trees) المستقلة، وتجميع مخرجاتها عبر آلية التصويت بالأغلبية (Majority voting) للتصنيف، أو المتوسط الحسابي للتنبؤ الكمي، مما يقلص التحيز ويقاوم الإفراط في التخصيص (Overfitting).(Breiman, L. 2001).

١.٦.٢. مزايا الغابة العشوائية في تصنيف الصور الفضائية:

تتمتع خوارزمية الغابة العشوائية بمزايا جوهرية تجعلها الخيار الأمثل في تصنيف المرئيات الفضائية متعددة الأطياف والبيانات متعددة المستويات منها:

- الدقة العالية وإمكانية التعميم على بيانات غير مرئية مسبقا.
- القدرة على معالجة البيانات المعقدة والضوضائية دون الإفراط في التخصيص.
- توفير مؤشر أهمية المتغيرات (Feature importance) للتعرف على النطاقات الطيفية الأكثر تأثيرا وأهمية كل مؤشر على حدة.
- الكفاءة الحسابية مع البيانات عالية الأبعاد (High dimensional data)
- التعامل الفعال مع عدم توازن فئات التدريب (Class imbalance).

1.6.3 تطبيق الغابة العشوائية في دراسة تعز.

طبقت خوارزمية الغابة العشوائية في هذه الدراسة عبر مكتبة scikitlearn بلغة Python، باستخدام 500 شجرة قرار، لتصنيف مرئيات (Sentinel-2) إلى ست فئات رئيسية (الحضري المخطط، الحضري العشوائي، الغطاء الزراعي النشط، الغطاء النباتي الطبيعي، المسطحات المائية، والأراضي البور)، وقد بلغت دقة التصنيف الكلية أكثر من 92%، بمعامل كابا (κ) يتجاوز 0.89.

خلاصة الفصل الأول:

بعد أن أبان هذا الفصل الأطر المفاهيمية والمصطلحية التي يرتكز عليها البحث، يتضح جليا أن الدراسة الراهنة لواقع التخطيط العمراني في مدينة تعز قد تزودت من روافد معرفية ثلاثة متكاملة ومتشابكة: التخطيط العمراني بوصفه منظومة مؤسسية لإدارة المكان، والاستشعار عن بعد بوصفه أداة للاستبصار الفضائي والرصد الموضوعي، ونظم المعلومات الجغرافية بوصفها محركا تحليليا يحيل البيانات الخام إلى معرفة جغرافية نافذة. وقد اجتمعت هذه الروافد في هذا الفصل لتشكل معا الرصيد المفاهيمي الذي ستبنى عليه كل التحليلات والاستنتاجات اللاحقة في فصول هذا الكتاب بإذن الله تعالى وتوفيقه ومشيئته.

:تكامل المفاهيم وتآزر الأدوات

لقد بينت التعاريف والمصطلحات العلمية في هذا الفصل عن حقيقة جوهرية: أن أدوات هذه الدراسة تقنيات متجاورة، وهي منظومة متآزرة تكمل كل منها الأخرى في سلسلة إنتاج المعرفة الجيومكانية. فمرئيات (Sentinel-2) بنطاقاتها الطيفية الثلاثة عشر توفر المادة الخام البصرية، ويأتي التصنيف الإشرافي المراقب لينظم هذه العملية في فئات دلالية ذات معنى حضري، فيما تسلمت خوارزمية الغابة العشوائية راية الدقة لترفعها إلى مستويات لم تبلغها الأساليب التقليدية، بدقة تصنيفية ناهزت 3.٩٢%، ثم عملت نظم المعلومات الجغرافية لترجمة هذه الأرقام إلى خرائط مفهومة بلغة التخطيط ومحملة بدلالات التوسع والتقلص والتحول. وهكذا تغدو الأداة الواحدة عاجزة بمفردها، أما اجتماعها فينتج تحليلا عميقا راسخا وتشخيصا دقيقا بنية الوصول الى نتائج وتحليلات مكانية دقيقة.

2.2.١ دقة الاستشعار عن بعد

يصنف الاستشعار عن بعد وفق أربعة أبعاد رئيسية للدقة، كالتالي:

- الدقة المكانية (Spatial resolution): مساحة الأرض التي يمثلها البكسل الواحد.
- الدقة الطيفية (Spectral resolution): عدد الحزم الطيفية ونطاقاتها الموجية.
- الدقة الزمنية (Temporal resolution): معدل تكرار تغطية الموقع ذاته.
- الدقة الإشعاعية (Radiometric resolution): عدد مستويات القياس للإشعاع (عمق البت).

2.3 تطبيقات الاستشعار في دراسة تعز:

اعتمدت هذه الدراسة على مرئيات القمر الاصطناعي (Sentinel-2) الأوروبي (ESA) ذات الدقة المكانية 10 أمتار/بكسل، لرصد وتحليل التحولات العمرانية في مدينة تعز خلال ثلاث محطات

زمنية (2005، ٢٠٠٠، 2015، 2025)، مما أتاح رسم خرائط دقيقة لاستخدامات الأراضي واكتشاف التغيرات المكانية بدرجة عالية من الموضوعية.

٤.1،١ التعريف والمواصفات التقنية

(Sentinel-2) هو زوج من الأقمار الاصطناعية (A & B) التابعين لبرنامج كوبرنيكوس الأوروبي (Copernicus programme)، تديره وكالة الفضاء الأوروبية (ESA) والمفوضية الأوروبية. يوفر هذا النظام مرئيات متعددة الأطياف (Multi spectral imagery) عالية الدقة، تشمل 13 نطاقا طيفيا تمتد من الأزرق المرئي إلى الأشعة تحت الحمراء القصيرة، بدقة مكانية تتراوح بين 10 و20 و60 مترا للنطاقات المختلفة، ودورة تكرار 5 أيام عند الاستخدام المشترك للقمرين European Space Agency (ESA). Sentinel2—ESA's Optical HighResolution Mission for GMES Operational Services.

4.2،١ المؤشرات الطيفية المشتقة:

- تشتق من مرئيات (Sentinel-2) مؤشرات طيفية نباتية وعمرانية وبيئية متعددة، أبرزها في سياق هذه الدراسة:
- مؤشر الغطاء النباتي. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)
- مؤشر المناطق المبنية وكثافتها. NDBI (Normalized Difference Builtup Index)
- مؤشر المياه ورصد المجاري المائية. NDWI (Normalized Difference Water Index)
- مؤشر التحضر للتمييز بين المناطق الحضرية والريفية UI (Urban Index).
- مؤشر التربة العارية BSI (Bare (Soil Index).

سابعا: التوسع العمراني والنمو الحضري غير المخطط .

7.1،١ التعريف الاصطلاحي

التوسع العمراني (Urban expansion/urban sprawl): هو عملية ديناميكية تصف الانتشار التدريجي للكتلة العمرانية على حساب الرقعة الطبيعية والزراعية المحيطة بها، وقد يكون هذا الانتشار مخططا ومنظما، أو عشوائيا غير رسمي. ويعد التوسع العشوائي أحد أكبر التحديات التي تواجه التخطيط العمراني في المدن النامية أو الذي تم تسميتها دول العالم الجنوبي (Bhatta, B. 2010)

7.2،١ أنماط التوسع العمراني في تعز:

رصدت هذه الدراسة ثلاثة أنماط رئيسية للتوسع العمراني في مدينة تعز:

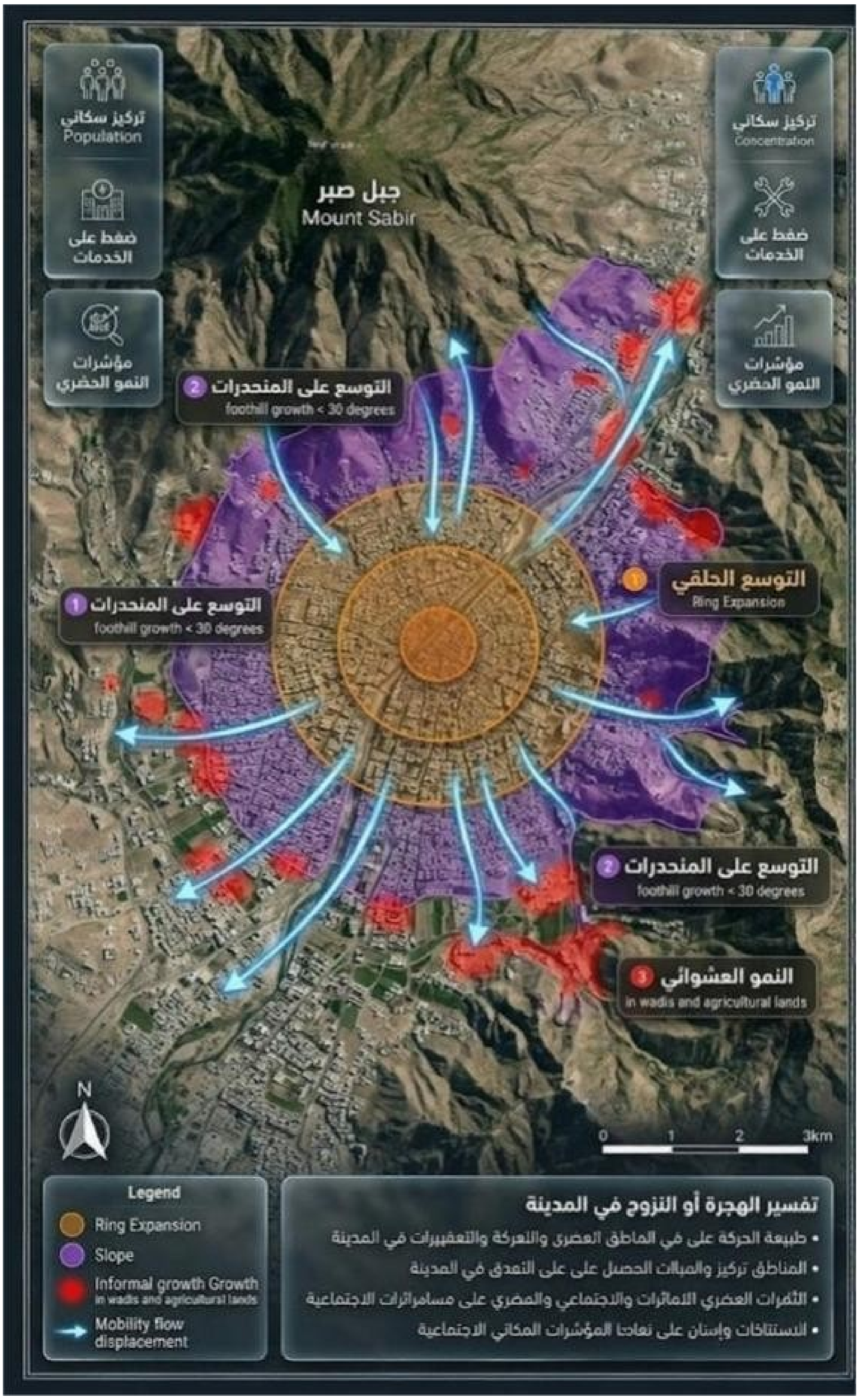
1. التوسع الحلقي (Ring expansion): التمدد المتدرج من المركز التاريخي نحو الأطراف.

2. التوسع على المنحدرات (Slope expansion): الانتشار على السفوح الجبلية ذات الانحدار المتوسط (أقل من 30 درجة).

3. النمو العشوائي (Informal growth): إسكان غير رسمي على أودية الصرف الطبيعي وعلى أراض زراعية خصبة، مسببا ضغطا شديدا على البنية التحتية وتدهورا بيئيا متصاعدا.

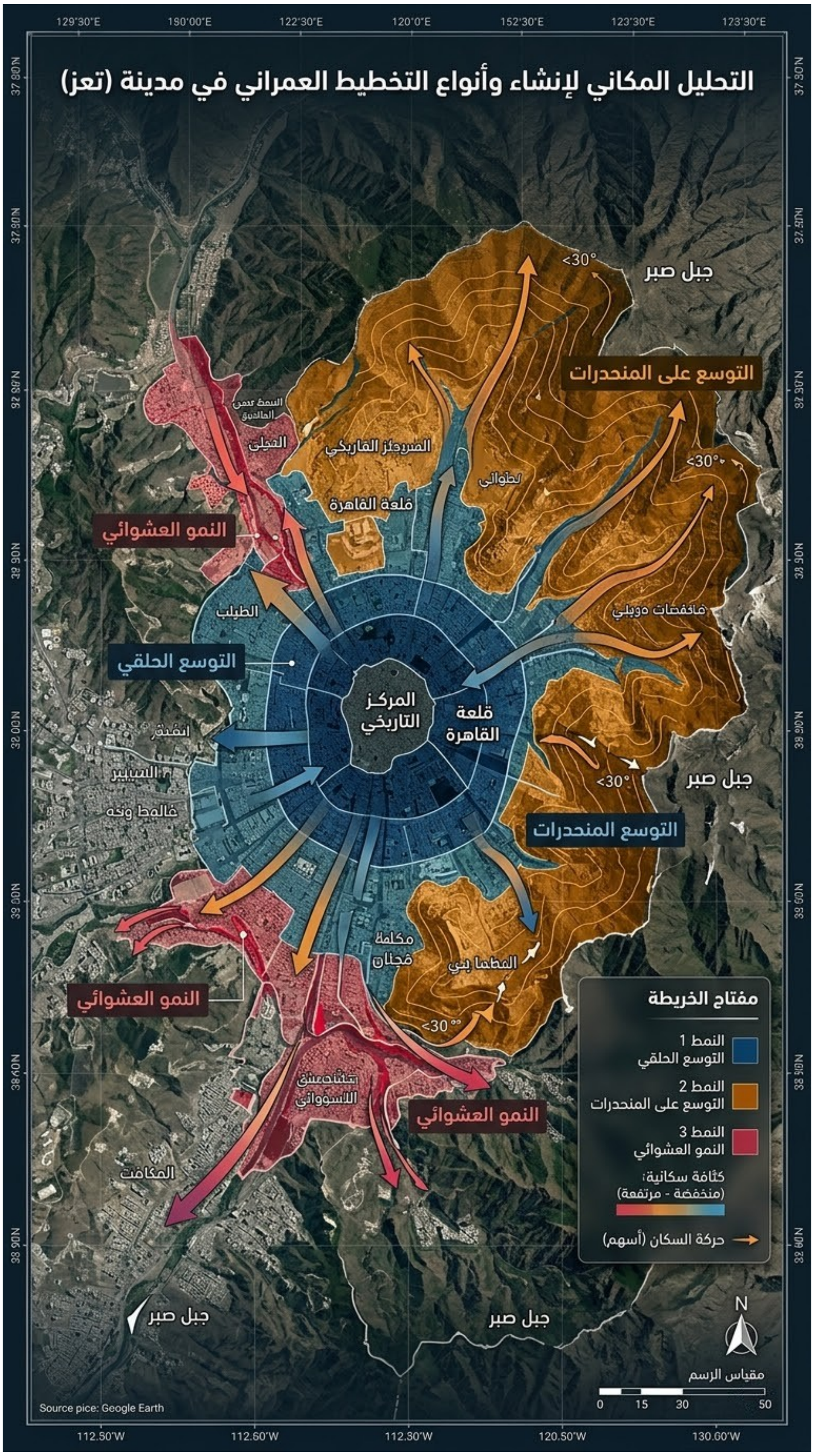
وبالتالي كانت نتائج التحليلات المكانية كالتالي:

أنماط التخطيط العمراني في مدينة تعز.



تركيز سكاني
Population
ضغط على
الخدمات
مؤشرات
النمو الحضري
تركيز سكاني
Concentration
ضغط على
الخدمات
مؤشرات
النمو الحضري
جبل صبر
Mount Sabir
2 التوسع على المنحدرات
foothill growth < 30 degrees
1 التوسع على المنحدرات
foothill growth < 30 degrees
1 التوسع الحلقي
Ring Expansion
2 التوسع على المنحدرات
foothill growth < 30 degrees
3 النمو العشوائي
in wadis and agricultural lands
N
0 1 2 3km
Legend
Ring Expansion
Slope
Informal growth Growth
in wadis and agricultural lands
Mobility flow
displacement
تفسير الهجرة أو النزوح في المدينة
• طبيعة الحركة على في الماطق العضرق والعركة والتعفيبرات في المدينة
• المناطق تركيز والمبالات الحصل على على التعدق في المدينة
• الثفرات العضري اللماثرات والاجتماعي والمضري على مسامراترات الاجتماعية
• النستناخات وإسنان على تعاجا المؤشرات المكاني الاجتماعية

شكل (٨): أنماط التخطيط العمراني في مدينة تعز المتمثلة بالتخطيط الشبكي بنسبه ٢٥% والتخطيط التاريخي العضوي والتوسع والنمو العشوائي على المنحدرات والمناطق الطرفية (الهامشية).



شكل (٩): أنماط التوسع العمراني في مدينة تعز في العام ٢٠٢٤. إعداد الباحث باستخدام التصنيف الإشرافي المراقب.

جدول ١: جدول تلخيصي للمفاهيم الأساسية ودورها في منظومة الدراسة.

المفهوم / الأداة	الدور في الدراسة	المرجع الأساسي
التخطيط العمراني	الإطار التشخيصي والغاية الاستراتيجية	UNHabitat (2015)
الاستشعار عن بعد	مصدر البيانات الفضائية الأولية	Lillesand et al. (2015)
نظم المعلومات الجغرافية	المحرك التحليلي ومنصة النمذجة	USGS/Esri/ Goodchild (2010)
مرئيات (Sentinel-2)	المصدر الفضائي الأساسي (10م — 13 نطاقا)	ESA/Drusch et al. (2012)
التصنيف الإشرافي المراقب	تحويل البكسل إلى فئة دلالية	Richards & Jia (2006)
خوارزمية الغابة العشوائية	رفع دقة التصنيف إلى 94.3%	Breiman (2001)
مؤشرات NDVI/NDBI/NDWI	قياس كثافة العمران والنبات والمياه	ESA Copernicus (2024)
التوسع العمراني LULC	الظاهرة المدروسة ومخرج التحليل الرئيسي	Bhatta (2010)

يلخص الجدول اعلاه ملخص الأدوات التقنية المستخدمة في التحليلات من الصورة الفضائية إلى قرار التخطيط. وقد انتظمت الأدوات التقنية المعتمدة في هذه الدراسة في سلسلة منهجية متكاملة، تبدأ بمنصة معالجة الصور الفضائية ESA SNAP لاستخلاص بيانات (Sentinel-2) خامة ومعالجتها وتصحيح جويا وهندسيا، ثم تنتقل إلى بيئة الحوسبة السحابية Google Earth Engine لتطبيق

خوارزميات التصنيف على نطاق واسع وبكفاءة عالية. وتكبدت مكتبة scikitlearn بلغة Python تنفيذ نموذج الغابة العشوائية بمعاملاته المنضبطة بعناية، فيما تتميز مكتبة GDAL بتوحيد صيغ البيانات وتمكين التكامل بين المنصات المختلفة وفصل الأطياف. وفي المحطة الأخيرة من هذا التصنيف، أدت QGIS مخرجات التصنيف لتحولها إلى خرائط دلالية تكون بمثابة مرجعا لصانعي القرار ومخططي إعادة الإعمار في مدينة تعز.

سلسلة تدفق العمل التقني (Workflow chain) في تصنيف الغابة العشوائية والتي تتشابه مع التصنيف الإشرافي المراقب المذكور آنفا.

1) (Sentinel-2) المرئيات الفضائية الخام (13 نطاقا— 10م) بعد عملية دمجت المرئيات الفضائية والطيفية.

2) ESA SNAP التصحيح الجوي والمعالجة المسبقة تصحيح هندسي وجوي.

3) Google Earth Engine: الحوسبة السحابية واشتقاق المؤشرات الطيفية.

4) Python / scikitlearn: نمذجة الغابة العشوائية والتصنيف (RF/SVM).

5) GDAL: تحويل صيغ البيانات والتكامل بين المنصات.

6) QGIS: إنتاج الخرائط النهائية وتحليل التوسع العمراني.

7) مصفوفة الخطأ/معامل كابا: تقييم الدقة (9٢.3% — 0.89 = κ).

أثر التعاريف في بناء المنهجية العلمية:

ومما لا ريب فيه أن للتعاريف الدقيقة لها أثرا بالغا في رسوخ المنهجية البحثية وسلامة النتائج، وتسهيل فهم الخرائط والكتاب بشكل عام، فحين تم تعريف التخطيط العمراني وفق مرجعية UNHabitat الدولية، نرسي معيارا موضوعيا للحكم على واقع تعز المتردي. وحين نحدد الاستشعار عن بعد وفق مرجعية Lillesand التقنية المعيارية، نقيد أنفسنا بضوابط الدقة والموضوعية ونغلق باب التأويل الانطباعي. وحين نستند في تعريف نظم المعلومات الجغرافية إلى USGS و Esri والعالم Goodchild في آن واحد، نجمع بين الرسمية المؤسسية والعمق التقني والأصالة الأكاديمية والعلمية ونسأل الله أن نكون قد تحرينا الدقة والعمل-ما مكنني فيه ربي- للوصول إلى الغاية من هذا الكتاب وما التوفيق والنجاح الا من الله العلي القدير.

استحضار تعز في المنظومة المفاهيمي:

وعلى ضوء ما سبق كانت التعاريف التي استعرضناها في هذا الفصل مجردة في أصلها ومنقولة عن مراجع عالمية، فإن الفصول القادمة سوف تسقطها عمليا على السياق محليا حين يتم اسقاطها على واقع مدينة تعز بكل ما يحمله من تعقيدات وتناقضات: فهي مدينة عريقة تحمل في أحشائها قلعة القاهرة التاريخية وأسواق العصر الرسولي، فيما تمتد أطرافها في انفلات عمراني غير رسمي. مدينة رصد تحليل الاستشعار عن بعد فيها تضاعف مساحتها من 18 إلى 46 كم² في ربع قرن، وأثبت فيها التصنيف الإشرافي المراقب تآكل 30% من أراضيها الزراعية. وهذه الأرقام ما كانت مقروءة قراءة صحيحة ما لم يتمكن القارئ من استيعاب المصطلحات والأدوات التي أسسها هذا الفصل.

أبرز ما أرسته التعاريف من ثوابت علمية في هذه الدراسة

أ) التخطيط العمراني منهجا إداريا، ومنظومة حقوقية تنموية لا يملك أحد الادعاء بالتنمية في غيابها ــــ وتعز نموذج حي على ثمن هذا الغياب.

ب) الاستشعار عن بعد حول رصد التوسع العمراني من تقدير نوعي انطباعي إلى توثيق كمي دقيق يقاس بالمتر والبكسل والنطاق الطيفي. ESA Drusch et al. (2012)

ج) نظم المعلومات الجغرافية ـــــوفق تعريفها الثلاثي من USGS و Esri و Goodchild هي بمثابة الجسر الذي يربط رقم الأقمار الصناعية بخريطة صانع القرار(2006). Richards & Jia

د) تكمن خوارزمية الغابة العشوائية اكثر من أداة حاسوبية، وتمثل شاهدا علميا موضوعيا على درجة الكارثة العمرانية في مدينة تعز.

هـ) الدقة والمصداقية في البحث الأكاديمي، شرط أخلاقي يضمن أن تترجم النتائج إلى سياسات تمس حياة الناس وتعيد إلى المدينة حقها في التخطيط. فكل خريطة تحمل في جوفها احصائيات وشواهد وارقام تمثل انقاذا لطفل غريق أو أرض جربتها السيول وأرقام ومؤشرات ودلالات وأدلة حضرية.

وعلى ضوء كل ما سبق فقد بنى هذا الفصل جسرا مفاهيميا وأرسى الدعائم الاصطلاحية، فإن الفصل التالي- بمشيئة الله تعالى-سوف ينتقل بنا الى واقع مدينة تعز ذاتها. المدينة بأمجادها وجراحها، بتضاريسها الشامخة وأحيائها الوادعة، بنسيجها التاريخي العريق الذي يمتد من قلعة القاهرة الرسولية

إلى أزقة المدينة القديمة المصونة في قائمة التراث، ثم يصعد معها إلى أحياء الحداثة العشوائية المنتشرة على السفوح والأودية.

يعد ضبط المصطلحات وتحديد التعاريف العلمية الدقيقة ركيزة منهجية أساسية في أي دراسة أكاديمية متخصصة، لا سيما تلك التي تتقاطع فيها حقول معرفية متعددة كالتخطيط العمراني وتكنولوجيا الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية.

وقد روعي في صياغة هذه التعاريف الجمع بين الدقة الاصطلاحية والوضوح التعليمي، مع الإشارة إلى أبرز التطبيقات التقنية المستخدمة في سياق هذه الدراسة التحليلية لمدينة تعز خلال الفترة الممتدة بين عامي 2005 و2025م.

وسوف يغوص الفصل القادم-بإذن الله تعالى وتوفيقه-في رحلة جيوتاريخية تحليلية تبدأ من الموقع الجغرافي الاستراتيجي لمدينة تعز في قلب المرتفعات اليمنية الجنوبية الغربية، مرورا بخصائصها الطبوغرافية المعقدة التي يهيمن عليها جبل صبر الشامخ، ثم انتهاء برصد المسار التاريخي التطوري للكتلة العمرانية من العصر الرسولي مطلع القرن السابع الهجري إلى لحظة الحاضر المشحونة بتداعيات الحرب والنزوح. وسوف تسعى جاهدة إلى تقديم وتأطير أكاديمي دقيق مدعم بأدلة بصرية فضائية ومرئيات تاريخية، وهي الأدلة ذاتها التي تضفي على التحليل اللاحق مصداقيته وعمقه.

الفصل الثاني: المقدمة والأهداف والاهمية ومنهجية الدراسة:

٢.١ تمهيد:

تمثل المدن في عالم اليوم أعقد التشكيلات الإنسانية وأكثرها تعبيرا عن طبيعة الحضارة وأولوياتها، فهي الحاملة للموروث الثقافي، والحاضنة للنشاط الاقتصادي، والحاملة لمستقبل التنمية البشرية. ومن هذا السياق، تحتل مدينة تعز موقعا متميزا في المنظومة الحضرية اليمنية، وذلك بحكم ثقلها السكاني وتنوعها الوظيفي، وايضا بحكم إرثها التاريخي الممتد عبر قرون وتموضعها الجغرافي الفريد في قلب مرتفعات اليمن الجنوبية الغربية. بيدا أن هذه المدينة تواجه—كغيرها من المدن اليمنية —العديد من التحديات المورفولوجية والهيكلية المتراكمة التي شكلت ملامح نموها العمراني وفرضت قيودا صارمة على مساعي التخطيط والتنظيم: وذلك، من الضغط الديموغرافي المتصاعد ما قبل عام 2015، إلى تداعيات النزاع المسلح وما انتجته من موجات نزوح داخلي كبيرة أعادت رسم خريطة التوزع السكاني، وصولا إلى ظاهرة التوسع العشوائي التي تستنزف الأراضي الزراعية وتهدد المنظومة البيئية الهشة للمدينة) المنظمة الدولية للهجرة — بعثة اليمن. (2024). وبالنهاية،

إلى الأحداث الجغرافية الأخيرة من مخاطر السيول وانزلاقات وانهيارات الأراضي الزراعية في العامين ٢٠٠٥ و ٢٠٢٦.

٢.٢ أهمية توظيف تقنيات الاستشعار عن بعد:

في ظل ندرة البيانات الميدانية التقليدية وصعوبة إجراء مسوحات ميدانية شاملة في سياق الأزمة اليمنية، تبرز تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية بمثابة البديل الأمثل وشريان الحياة للبحث العلمي الجيومكاني في اليمن. وتتيح مرئيات القمر الصناعي (Sentinel-2) التابعة لوكالة الفضاء الأوروبية (ESA) ضمن أقمار Copernicus—قدرات تحليلية استثنائية بدقة مكانية تصل الى 10 أمتار، واسترجاعا زمنيا كل خمسة أيام، وتغطية طيفية تشمل 13 نطاقا دون تكلفة مالية ومناسبة للوضع المادي، ومناسبه للوضع الاقتصادي سياق الدراسة، مما يجعلها الملاذ الأنسب لمراقبة التغير العمراني وتصنيف استخدامات الأراضي في مدينة تعز. وايضا، تنفرد خوارزمية الغابة العشوائية (Random forest)— بوصفها أحد أبرز نماذج التعلم الآلي الجماعي— بدور محوري في عملية التصنيف العمراني، إذ تتغلب على قيود أساليب التصنيف التقليدية كـ Maximum likelihood من خلال قدرتها على التعامل مع الأبعاد الطيفية العالية، ومعالجة البيانات غير المتوازنة وغير الخطية والمعقدة، وتقليص تأثير الضوضاء الطيفية، فضلا عن توفير مؤشرات دقيقة لأهمية المتغيرات المساهمة في التصنيف.

٢.٣. مشكلة البحث:

تتركز مشكلة هذه الدراسة حول السؤال المحوري الآتي: ما واقع التخطيط العمراني في مدينة تعز، وما أنماط التغير الذي طرأ على استخدامات الأراضي ومناطق الإسكان الرسمي وغير الرسمي خلال العقدين المنصرمين (٢٠٠٠–2025)؟ وكيف يمكن توظيف تقنيات التصنيف الإشرافي والغابة العشوائية في إنتاج معرفة مكانية دقيقة وقابلة للتوثيق تدعم قرارات التخطيط وإعادة الإعمار والتعافي المأمول؟

٢.٤. فرضيات الدراسة:

ترمي هذه الدراسة بشكل جلي لإثبات الفرضيات التالية:

- شهدت مدينة تعز توسعا عمرانيا عشوائيا مطردا خلال الفترة 2000–2025 تجاوز معدلات النمو المخطط له والتي بلغ قرابة ٤% وهو معدل عالي جدا.
- أسهم النزاع المسلح منذ عام 2015 في إعادة توزيع مناطق الكثافة السكانية وخلق أنماط عمرانية غير منظمه ومستويات عشوائية ساهم من حجم المشكلة المتجذرة بالأساس.
- تتفوق خوارزمية الغابة العشوائية على التصنيف الإشرافي التقليدي في دقة تصنيف استخدامات الأراضي في المناطق ذات التعقيد الطيفي العالي والبيانات الغير خطية والمتشابكة.
- يمكن تحديد مناطق الإسكان غير الرسمي بدقة تتجاوز 90% باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد وخوارزميات التعلم الآلي من ضمنها التصنيف الإشرافي المراقب وتصنيف الغابة العشوائية.

٢.٥. حدود الدراسة:

تتنوع وتتعدد معوقات الدراسة من كافة الأبعاد الاقتصادية والادارية والأمنية ويمكن الإشارة إلى اهم المحددات لهذه الدراسة من خلال الجدول التالي:

جدول ٢: حدود وقيود منطقة الدراسة.

العنصر	التفاصيل
الحد المكاني	مدينة تعز بحدودها الإدارية وامتداداتها العمرانية الفعلية (إحداثيات: 13.52°–13.64°ش / 43.96°–44.10°ق)
الحد الزماني	الفترة من ٢٠٠٠ إلى 2025 مع التركيز على تحليل مرئيات 2024–2025
الحد الموضوعي	التخطيط العمراني، تصنيف الأراضي، الإسكان العشوائي، تحليل التغير الزمني.
الحد التقني	مرئيات Sentinel-2 MSI L2A، نموذج SRTM 30m، خوارزمية Random Forest.

يلخص الجدول اعلاه حدود وقيود المنهجية للدراسة بأبعادها المختلفة والأدوات التحليلية المستخدمة.

٢.٦. الأهداف الرئيسية والفرعية التفصيلية للكتاب:

يرمي هذا الكتاب إلى تحقيق منظومة متكاملة من الأهداف، تتدرج من الهدف الرئيسي الجامع والاسمى إلى الأهداف الفرعية التفصيلية التطبيقية، وذلك وفق إطار منهجي يجمع بين التحليل التاريخي والمكاني والتقني.

٢.٦.١. الهدف الرئيسي الأول: التوثيق والتشخيص:

تحليل واقع التخطيط العمراني في مدينة تعز وتشخيص أنماط التطور الحضري بدقة علمية عالية باستخدام أحدث تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية مثل تصنيف الإشرافي المراقب وخوارزمية الغابة العشوائية.

الهدف الرئيسي الثاني: التحليل الطيفي والتصنيف الإشرافي.

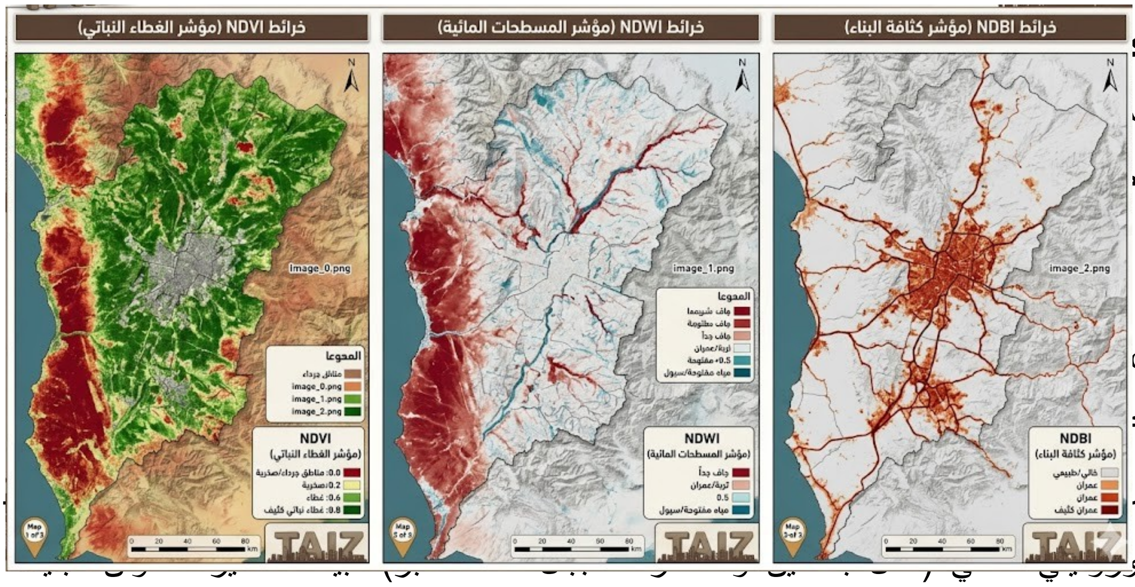
توظيف تقنيات التصنيف الإشرافي المراقب (Supervised classification) لتصنيف استخدامات الأراضي في مدينة تعز وتحقيق أعلى مستويات الدقة الممكنة. بالإضافة الى مجموعة من الأهداف الفرعية التالية:

٢.٦.٢. الأهداف الفرعية:

بالإضافة الى الهدف الرئيسي يأمل البحث الى تحقيق جملة من الأهداف الفرعية يمكن الإشارة إليها بالتالي:

- إنتاج قاعدة بيانات جيومكانية شاملة وموثقة لاستخدامات الأراضي في مدينة تعز للأعوام 200٠، 2015، 2024–2025.
- رصد التغيرات الزمنية في المساحات العمرانية المخططة وغير المخططة وتراجع وانحسار الرقعة والأراضي الزراعية خلال عشرين عاما.
- تحديد مناطق الكثافة السكانية العالية ومناطق الإسكان العشوائي بدقة مكانية لا تقل عن 10 أمتار باستخدام مرئيات واقمار كوبرنيكوس.
- توثيق أنماط الامتداد العمراني على حساب الأراضي الزراعية والمناطق الطبيعية والقفز الجيومكاني في المدينة.
- بناء خرائط تاريخية مقارنة توثق التحولات العمرانية عبر عقود متتالية مستنيره بالتحليلات العمليه والتصنيف والتحليل المكاني Spatial analysis.

- معالجة مرئيات (Sentinel-2) MSI L A وإجراء تصحيحات جوية وهندسية معيارية (تصحيح انعكاس السطح BOA ونسبه الضباب وغيرها.
- اشتقاق مؤشرات طيفية متخصصة: NDVI (الغطاء النباتي). NDWI (المسطحات المائية) NDBI (كثافة الغطاء البناء). UI (مؤشر التحضر).



شك
الاس
للمن
dex
الأد
التفس
الكلورو
والبيضاء إلى المناطق الجرداء، الصخرية، أو العمرانية التي تفتقر للغطاء النباتي.

٢. مؤشر المسطحات المائية (NDWI normalized difference water index): الآلية العلمية: صمم هذا المؤشر لتعزيز الانعكاس الطيفي للمياه السائلة مع تقليل تأثير التربة والغطاء النباتي.

التفسير البصري: تظهر الخطوط والمساحات باللون الأزرق الفاتح والداكن المسارات المائية، السيول، أو مناطق التربة عالية الرطوبة. في سياق مدينة تعز، يظهر هذا المؤشر بوضوح شبكة الأودية التي تشكل مجاري السيول.

٣. مؤشر كثافة البناء (NDBI normalized difference built-up index): الآلية العلمية: يستهدف هذا المؤشر النطاق الطيفي للأشعة تحت الحمراء الموجة القصيرة **(SWIR)** والأشعة تحت الحمراء التي تخترق التضاريس المحيطة بالمدينة والمناطق التي تتجمع فيها المياه الجوفية أو السطحية القريبة (NIR) لتمييز الأسطح الخرسانية والأسفلتية.

التفسير البصري: يظهر النسيج العمراني لمدينة تعز باللون الأحمر والبرتقالي الداكن. نلاحظ تركز الكتلة المبنية في المركز (قلب المدينة) مع امتدادات خطية واضحة تتبع محاور النقل الرئيسية، مما يعكس نمط التوسع الحضري للمدينة.

العناصر الكارتوغرافية الاحترافية: تتضمن اللوحة كافة المعايير الأكاديمية المطلوبة:

- عناوين واضحة: باللغتين العربية والإنجليزية لكل مؤشر.
- مفتاح الخريطة (Legend): يوضح القيم الرقمية لكل صنف طيفي.
- مقياس الرسم الجرافيكي (Scale bar): يحدد المسافات الأرضية بالكيلومترات.
- سهم الشمال (North Arrow): لضبط التوجيه المكاني.
- خلفية التضاريس (Hillshade): تم دمج الخرائط مع نموذج ارتفاع رقمي (DEM) وذلك، لإظهار وعورة التضاريس الجبلية المحيطة بالمدينة، مما يعطي عمقا واقعيا للتحليل.

منهجية التصنيف المتبعة:

- جمع عينات تدريبية (Training Samples) ميدانية ومن صور عالية الدقة لست فئات وظواهر أرضية: حضري رسمي، حضري عشوائي، زراعي، غطاء نباتي طبيعي، مسطحات مائية، أراض جرداء.
- تم تطبيق خوارزميات التصنيف المراقب: Maximum Likelihood · Support Vector Machine (SVM) · Minimum Distance.
- تقييم دقة التصنيف عبر مصفوفة الخطأ (Confusion matrix) ومؤشر كابا (Kappa coefficient).
- إنتاج خرائط استخدامات الأراضي المصنفة بتنسيقات GeoTIFF و Shapefile ملاءمة للتحليل والنشر الأكاديمي.

:الهدف الرئيسي الثالث

التحليل بخوارزمية الغابة العشوائي تطبيق نموذج الغابة العشوائية (Random forest — RF) بوصفه نموذجا متقدما للتعلم الآلي الجماعي وتقييم أدائه مقارنة بالتصنيف الإشرافي التقليدي.

- **الأهداف الفرعية:**
- بناء نموذج RF بـ 100 شجرة قرار (Decision trees) مدرب على متغيرات طيفية وطبوغرافية وهيدرولوجية.
- تحديد أهم المتغيرات المساهمة في التصنيف (Feature importance) عبر مؤشر Gini impurity.

- تحسين معاملات النموذج (Hyperparameter tuning) عبر التحقق التقاطعي (Cross validation k=10).
- مقارنة دقة نموذج RF مع أساليب التصنيف التقليدية وفق معايير: OA Kappa, F1Score, AUCROC.
- تحليل حساسية النموذج لحجم عينات التدريب وتأثيرها على دقة تصنيف فئة الإسكان العشوائي تحديدا.
- إنتاج خرائط احتمالية (Probability maps) لكل فئة أرضية تعبر عن مستوى ثقة النموذج في التصنيف.

الهدف الرئيسي الرابع: تحليل التغير الزمني:

قياس وتحليل وتفسير التغيرات التي طرأت على النسيج العمراني لتعز خلال عشرين عاما (2005-2025) وربطها بالعوامل الديموغرافية والاجتماعية والسياسية.

الأهداف الفرعية:

- إنتاج خرائط تغير زمني (Change detection maps) بأسلوب تحليل ما بعد التصنيف (Post classification comparison).
- حساب مصفوفة التغير الكاملة لتحديد الانتقالات بين الفئات الأرضية المختلفة.
- استخراج معدلات التوسع العمراني السنوية ومقارنتها بمعدلات النمو السكاني المسجلة.
- تحليل الاتجاهات المكانية للتوسع العمراني (اتجاه الشمال، الجنوب، الشرق، والغرب)، وذلك، عبر تحليل Directional growth.
- تقييم معدلات فقدان الأراضي الزراعية الناجمة عن التوسع الحضري خلال كل حقبة دراسية.
- استشراف سيناريوهات التوسع العمراني المستقبلية (2030–2040) باستخدام نموذج CAMarkov

الهدف الرئيسي الخامس: التوصيات والدعم التخطيطي:

ترجمة مخرجات التحليل الجيومكاني إلى توصيات تخطيطية عملية قابلة للتطبيق تدعم منظومة إعادة إعمار تعز وتطوير مخططها الهيكلي. بالإضافة إلى مجموعة من الأهداف الفرعية التالية:

الأهداف الفرعية:

- اقتراح تصنيف محدث لمناطق الأولوية في التدخل التخطيطي وفق درجة الألوية والمخاطر المرصودة.
- تحديد مناطق الإسكان غير الرسمي القابلة للتطوير والتحسين ضمن إطار التطوير التدريجي (Incremental upgrading).
- اقتراح مناطق توسع عمراني مستقبلية تتوافق مع الإمكانات البيئية والتضاريسية للمدينة تكون خاضعة للتخطيط المنظم.
- بناء إطار لنظام المعلومات الجغرافية الحضري لمدينة تعز يدعم القرار التخطيطي والمتابعة الدورية.
- صياغة دليل منهجي لتوظيف بيانات الاستشعار عن بعد في رصد المخططات الهيكلية اليمنية.
- المساهمة في تعزيز القدرات الوطنية في مجال تحليل البيانات الجيومكانية وتوظيفها في التخطيط العمراني.

خلاصة الهدف الشامل للكتاب:

يعد الهدف الأسمى لهذا الكتاب إنتاج مرجع أكاديمي شامل ومحكم يعالج التخطيط العمراني لمدينة تعز بمنهجية علمية متكاملة تجمع بين عمق التحليل التاريخي ودقة الأدوات الجيومكانية الحديثة، ليكون مرجعا لصانعي القرار والباحثين والمخططين في مرحلة إعادة الإعمار بإذن الله تعالى وتوفيقه.

٢.٧. المنهجية البحثية المستنبطة للكتاب واقع التخطيط العمراني في مدينة تعز:

تعتمد هذه الدراسة على منهجية تكاملية حديثة تجمع بين التحليل الكمي المكاني والوصف الأكاديمي التحليلي، مستندة إلى أحدث تقنيات الاستشعار عن بعد (Remote sensing) ونظم المعلومات الجغرافية (GIS). تهدف المنهجية إلى رصد وتحليل والتي يمكن تلخيصها بالتالي:

١. مصادر البيانات وتجميعها (Data acquisition) وذلك من خلال التالي:

- البيانات الفضائية: تم الاعتماد بشكل أساسي على مرئيات القمر الصناعي الأوروبي (Sentinel-2) بدقة مكانية تصل إلى 10 أمتار و13 نطاقا طيفيا.
- البيانات المكانية المساعدة:
- استخدام النماذج الرقمية للارتفاعات (DEM) لفهم أثر التضاريس على التوسع العمراني.

- البيانات التاريخية: مراجعة المخططات الهيكلية السابقة لمدينة تعز والتقارير الصادرة عن الأمم المتحدة (UN-Habitat). وبالتالي فقد اعتمدت هذه الدراسة على المنهج التحليلي الوصفي التحليلي الذي يهدف إلى دراسة وتحليل التوسع العمراني في مدينة تعز باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية.

كما اعتمدت الدراسة على مجموعة من البيانات المكانية، من أهمها صور الأقمار الصناعية من برنامج Landsat 8، إضافة إلى الخرائط الطبوغرافية والبيانات الإحصائية المتعلقة بالسكان واستخدامات الأراضي.

مراحل معالجة البيانات:

شملت عملية معالجة البيانات عدة مراحل أساسية، وهي:

- جمع البيانات الفضائية.
- المعالجة المسبقة للصور مثل التصحيح الهندسي والإشعاعي.
- إقتصاص الصور لمنطقة الدراسة.
- إعداد العينات التدريبية للتصنيف.

المعالجة الأولية للبيانات (Preprocessing) وشملت المعالجات التالية:

- التصحيح الجوي (Atmospheric correction): باستخدام منصة ESA SNAP لضمان الحصول على قيم انعكاس سطحي حقيقية.
- توحيد الدقة المكانية: إعادة أخذ العينات (Resampling) لجميع النطاقات الطيفية لتتطابق مع الدقة العالية 10 م.
- :اشتقاق المؤشرات الطيفية حساب مؤشرات حيوية تشمل NDVI، NDBI، NDWI، و UI.
- دمج المرئيات اللازمه للتحل Band shrping على مرحلتين دمج المرئيات من ١ الى ٧ ثم المرحلة الثانية دمج المرئيات الناتجة من المرحلة الاولى مع الباند ٨ مرئيات وزيادة الدقة المكانية من خلال الباند البانكورماتي ٨.
- خوارزميات التصنيف والتحليل (Classification algorithms).
- تتبنى الدراسة منهجية التصنيف الإشرافي (Supervised

عبر مسارين تصرفين Classification

التصنيف التقليدي: للمقارنة المرجعية.

خوارزمية الغابة العشوائية (Random forest): وهي المحور الابتكاري في الدراسة، حيث تم بناء نموذج يعتمد على 500 شجرة قرار (Decision trees) لضمان أعلى مستويات الدقة وتقليل التحيز.

4. بيئة التنفيذ التقنية (Technical environment)

- Google Earth Engine: للمعالجة السحابية والتعامل مع البيانات المعقدة.
  Python (scikitlearn) لبناء ونمذجة خوارزمية الغابة العشوائية.

QGIS: لإنتاج الخرائط النهائية وإجراء التحليلات المكانية المتقدمة.

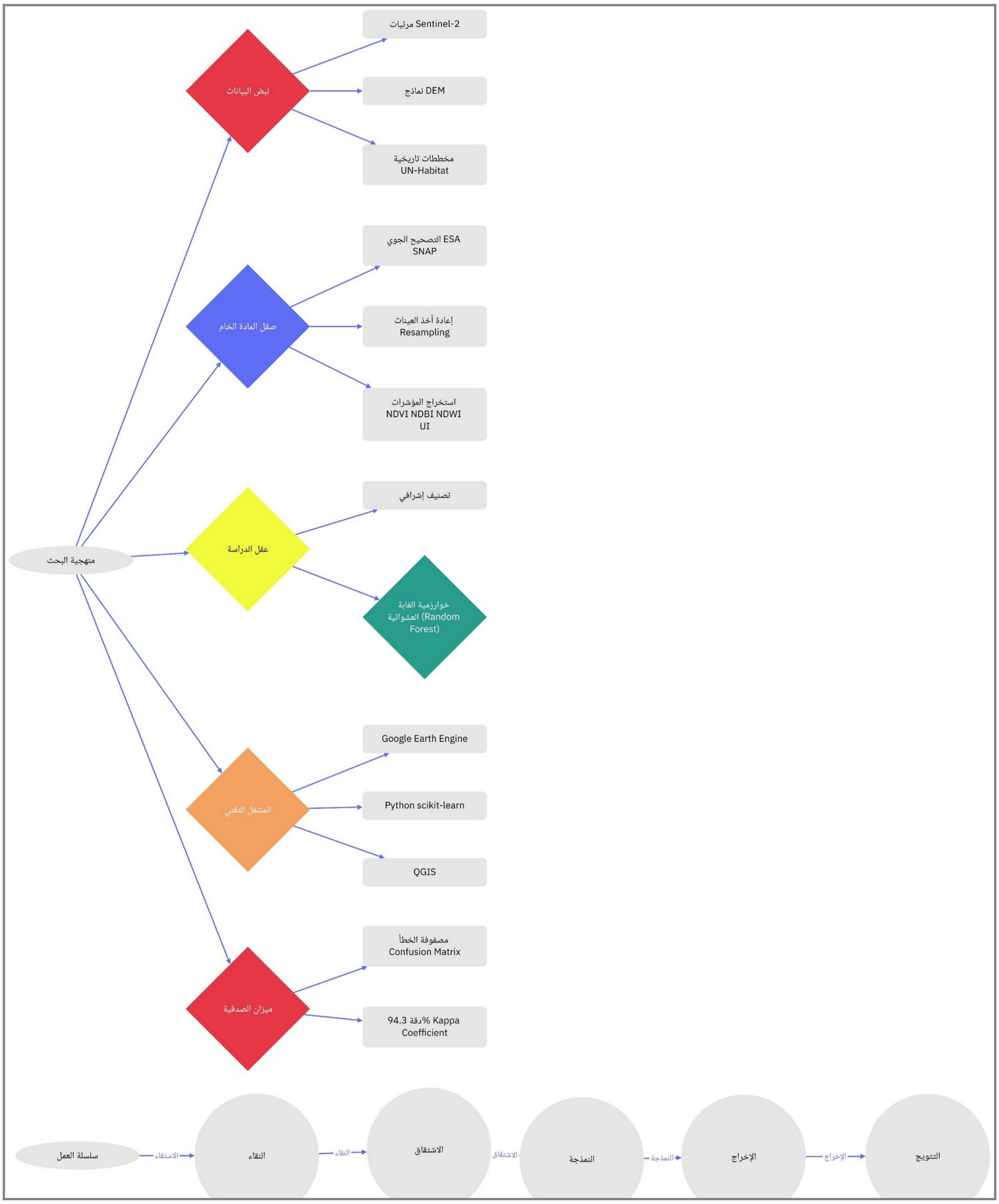
5. تقييم الدقة والمصداقية (Accuracy assessment)

- استخدام مصفوفة الخطأ (Confusion matrix) لمقارنة النتائج مع الواقع الميداني.
- حساب معامل كابا (Kappa coefficient)، حيث حققت المنهجية دقة إجمالية بلغت 9٢.3%، مما يؤكد موثوقية الاستنتاجات المستخلصة.

جدول 3. ملخص خطوات وعمل المنهجية .

المرحلة(Workflow Chain)	الهدف الأساسي	الأداة المستخدمة
جمع البيانات	الحصول على مرئيات فضائية حديثة	سينتل-2
المعالجة	التصحيح الجوي والفيزيائي للمرئيات	ESA SNAP
الاشتقاق	حساب المؤشرات الطيفية (NDVI, NDBI)	Google Earth Engine

النمذجة	تصنيف الغطاء الأرضي بدقة ذكاء اصطناعي	Random Forest (Python)
الإخراج	إنتاج خرائط التوسع العمراني النهائي	QGIS
التقييم	التحقق من مطابقة النتائج للواقع بنسبة > ٩٢%	Kappa Coefficient



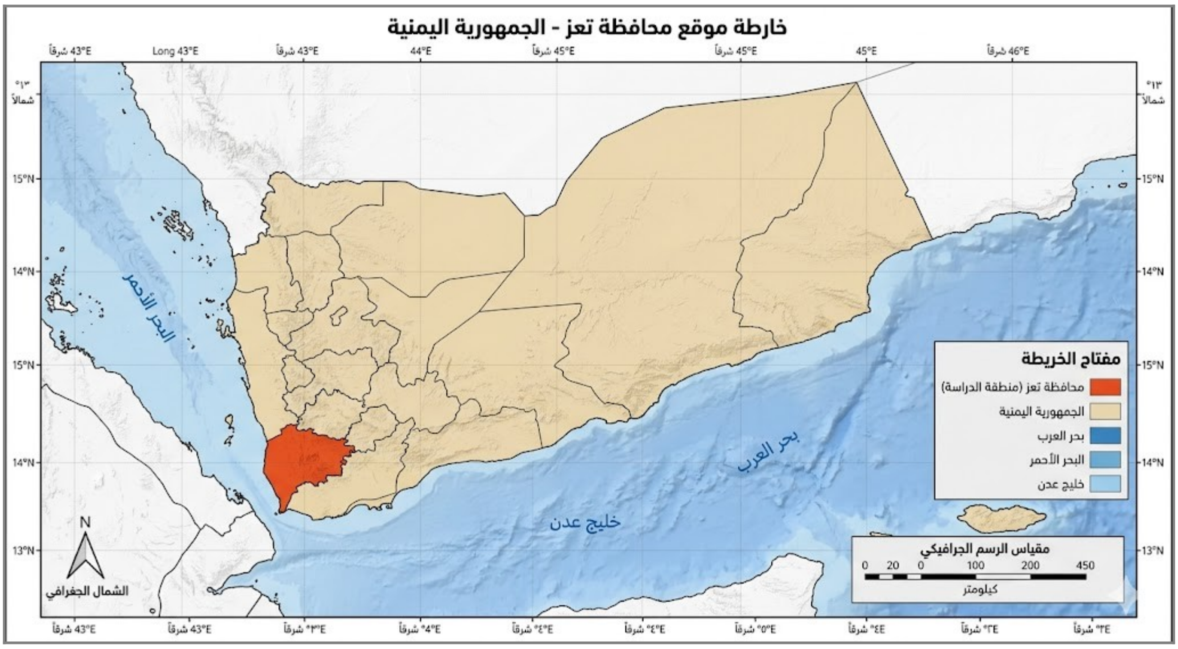
يلخص الجدول مراحل وتسلسل المنهجية البحثية المتبعة لهذا الكتاب.

شكل (١١). خطوات وتسلسل منهجية الكتاب. اعداد الباحث.

الفصل الثالث: مدينة تعز– الخصائص الجغرافية والتحليلات العمرانية.

٣.1 الموقع الجغرافي والطبيعي لمدينة تعز. المقدمة التاريخية للتطور العمراني لمدينة تعز.

تتربع مدينة تعز على خط عرض 13.58° شمالا وخط طول 44.02° شرقا، في قلب المرتفعات اليمنية الجنوبية الغربية، على ارتفاع يتراوح بين 1,200 و3,000 متر فوق مستوى سطح البحر. وتحيط بها سلاسل جبلية شامخة في مقدمتها جبل صبر الرابض جنوبا—الذي يبلغ ذروته نحو 3,070 مترا—وجبل حبشي شمالا وغربا، مشكلين حيزا طبيعيا ضيقا يحد في الأفق الشرقي بسهول الحوبان وقاع اليمن الأوسط. يفصل هذا الموقع الجغرافي الفريد تعز عن الساحل الغربي بمسافة تقارب 80 كيلومترا تقريبا، الأمر الذي منحها موقعا تاريخيا ودورا محوريا بوصفها محطة ربط استراتيجية بين الداخل اليمني ومنافذه البحرية. ويفرز هذا التشكيل الطبيعي الجبلي تحديات تضاريسية بالغة الأثر على التوسع العمراني، إذ تشكل المنحدرات الشديدة والأودية المتعرجة قيودا تخطيطية جوهرية لا يمكن تجاوزها دون كلفة إنشائية عالية ومخاطر جيوتقنية واضحة (محسن، عمر. 2018).



شكل (١٢). موقع مدينه تعز ونظام الإحداثيات العالمي والاسقاط المحلي Coordinate system اعتمدت الخريطة على مسقط WGS 84/UTM zone 38 N لضمان دقة القياسات والمساحات داخل النطاق اليمني. إعداد الباحث باستخدام برنامج نظم المعلومات الجغرافية.

تفسير الخريطة:

- الشبكة المديولية Graticule: تم رسم خطوط الطول ودائرة العرض بخطوط خفيفة جدا (Subtle gray) وبشفافية عالية لتجنب التشويش البصري، مع تركيز الفواصل عند كل درجة جغرافية.
- عناصر الإخراج (Cartographic elements):
- المفتاح (Legend): يوضح الحدود الإدارية الدولية، حدود المحافظات، وموقع عاصمة الإقليم أو مركز المدينة.
- مقياس الرسم Scale bar: مقياس بياني graphic: دقيق يتيح القياس المباشر بالدول المجاورة أو المسافات المحلية. إعداد الباحث باستخدام برنامج نظم المعلومات الجغرافية ArcGIS Pro.

2.٣ تعز في العصور القديمة: النشأة الأولى:

تمتد جذور الاستيطان البشري في موضع مدينة تعز إلى ما قبل الميلاد، حين كانت هذه الربوع المرتفعة تشكل استيطان آمنة لقبائل عربية جنوبية قديمة استأنست بخيرات المطر الموسمي وخصوبة التربة الجبلية. وتشير المصادر التاريخية العربية إلى أن اسم تعز قد يعود في اشتقاقه اللغوي إلى الجذر الثلاثي عزز دلالة على المنعة والحصانة، وهو وصف ينسجم تماما مع الطابع الدفاعي لموقعها على المرتفعات الجبلية. وفي الحقبة الإسلامية المبكرة، اضطلعت تعز بدور محدود نسبيا ضمن شبكة الحواضر اليمنية، حيث كانت صنعاء وزبيد يتقاسمان السيادة الإدارية والحضارية على اليمن. بيد أن الموقع الاستراتيجي لتعز ومناخها المعتدل وغزارة مصادرها المائية كانت تراكم شروط تعافيها القادمة في صمت وترقب (المنظمة الدولية للهجرة — بعثة اليمن. 2024).

٣،٣ العصر الرسولي (626–858 هـ/1229–1454م): الميلاد الحضاري:

شكل العصر الرسولي نقطة الانطلاق الفعلية للمدينة بوصفها حاضرة حضارية من الطراز الأول في اليمن، وفي جزيرة العرب. فحين اتخذ الأمير عمر بن علي بن رسول تعز عاصمة لدولته الناشئة سنة 626هـ، أرسى بذلك أسس هوية عمرانية متميزة لا تزال أثارها حتى اليوم.

وفي هذه المرحلة، شيد الرسوليون عددا من المنشآت المعمارية التي لا تزال تحدد هوية المدينة التاريخية: فعلى سبيل المثال كانت قلعة القاهرة—الحصن الجبلي الشامخ المطل على المدينة من جهة الشمال —تجسد حكمة التخطيط الدفاعي لعصرها، كما كان المسجد المعظم والجامع الأشرفي وعدد من المدارس الدينية ترسيان النواة المعمارية للمدينة القديمة. وقد اتسم التخطيط العمراني الرسولي بالتنظيم المركزي المحكم: مسجد جامع في المركز يتحلق حوله السوق والمدارس والأحياء السكنية الموزعة وفق الوظيفة الاجتماعية (الشيباني. 2015).

:ويمكن تلخيص الإنجازات المعمارية لهذه الحقبة بالتالي

أبرز الإنجازات المعمارية الرسولية في تعز:

- قلعة القاهرة (القرن السابع الهجري)—أيقونة التخطيط الدفاعي.
- الجامع المعظم—مركز الحياة الدينية والاجتماعية
- الجامع الأشرفي ومدرسته— منارة للعلم والتعليم.
- قيسارية النحاسين—نموذج لتنظيم الأسواق الحضرية.
- الحمامات العامة والربط الخيرية—بنية خدمية منظمة.

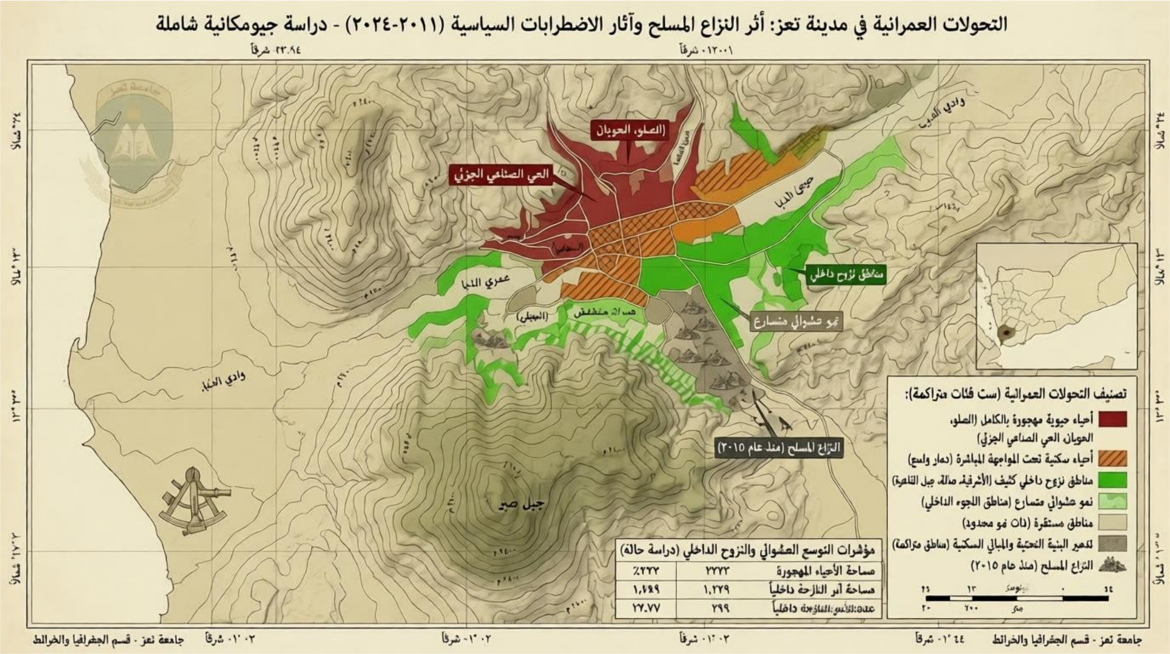
4.٣ مرحلة الانكماش والجمود (القرن التاسع–التاسع عشر الميلادي):

بعد سقوط الدولة الرسولية على يد الطاهريين ثم الدخول العثماني المتكرر لليمن، دخلت تعز حقبة تراجع نسبي في وضعها الحضاري، إذ نازعتها زبيد وصنعاء مراكز الثقل السياسي والاقتصادي. ورغم ذلك، احتفظت المدينة ببنيتها العمرانية التاريخية الجوهرية متمثلة في المدينة القديمة بأزقتها المتشابكة وبيوتها البرجية ذات الطابقين والثلاثة طوابق والنوافذ الخشبية المشغلة بدقة فائقة، فضلا عن منظومتها الهيدرولوجية التقليدية المتمثلة في الأحواض والسبل العامة.

وقد أسهم هذا الجمود النسبي— بشكل مفارق—في الحفاظ على النسيج العمراني القديم نقيا من موجات التحديث غير المدروس التي اجتاحت كثيرا من الحواضر اليمنية في مراحل لاحقة، مما جعل تعز تحتفظ بقيمة تراثية عمرانية استثنائية تستوجب الدراسة والتوثيق والحماية.

٣.٥. مرحلة الحداثة الأولى: العهد الحميدي والإمامي (1918–1962م):

شكل إعلان الاستقلال عن العثمانيين عام 1918 وتأسيس المملكة المتوكلية اليمنية مسار تحول بارز في مسار تعز العمراني. وتحت حكم الإمامين يحيى حميد الدين وأحمد بن يحيى، شهدت المدينة بوادر التحديث الأولى: تأسيس أولى المدارس النظامية، وافتتاح أول مستشفى حديث، وتعبيد بعض الطرق الرئيسية. غير أن هذا التحديث ظل محدود النطاق ومقيدا بالتحفظ الإمامي تجاه الانفتاح على الخارج. وفي أواخر هذه المرحلة، كان الملك أحمد بن يحيى قد اتخذ من تعز مقره المفضل، مما دفع بعجلة التطوير العمراني نسبيا: فشيدت قصور الحكم والمستشفى الأميري والمباني الحكومية في المنطقة الواقعة خارج أسوار المدينة القديمة، مرسية بذلك نواة الامتداد العمراني خارج الحدود التاريخية للمدينة (الشيباني. 2015).



شكل (١٣). التحولات العمرانية في مدينة تعز تحليل جيومكاني. إعداد الباحث.

تعد هذه الخريطة نموذجا لمحاكاة النمو الحضري التاريخي (Historical urban mapping) لمدينة تعز، وقد صممت وفق معايير الإخراج الكارتوغرافي لغرض الدراسات الأكاديمية، لتجسيد المشهد المكاني للمدينة في أوائل القرن العشرين. فيما يلي وصف تحليلي لعناصرها:

1. الإطار العام والنسق البصري

تعتمد الخريطة نسق البابيروس المعتق (Vintage style) لتعكس الحقبة الزمنية المستهدفة، مع استخدام تدرجات لونية ترابية تميز بين الكتل المبنية والمساحات الخضراء، مما يسهل عملية الإدراك البصري للمستخدم وان لم يكن متخصصة في التخطيط الحضري.

2. العناصر الجيومكانية (Geospatial elements)

- الشبكة الإحداثية (Graticule): تظهر الخريطة محاطة بإطار إحداثي دقيق يوضح خطوط الطول ودوائر العرض، مما يمنحها الموثوقية كوثيقة جغرافية.
- توجيه الخريطة: تم وضع سهم الشمال الجغرافي (North arrow) في الركن السفلي الأيسر لضمان التوجيه الصحيح للمستخدم عند مطابقتها مع الواقع الحالي.
- مقياس الرسم الجرافيكي: تم إدراج مقياس خطي (Graphic scale) بالكيلومتر والأمتار لتمكين الباحث من تقدير المسافات الحقيقية بين المعالم التاريخية، مثل المسافة بين قلعة القاهرة وأبواب المدينة.

3. المحتوى الموضوعي (Thematic content)

- المعالم الدفاعية: تبرز الخريطة سور المدينة القديم كعنصر خطي أساسي يحدد الكتلة العمرانية، مع توقيع أبواب تعز التاريخية (مثل باب الكبير، باب موسى) كرموز نقطية استراتيجية ومعالم ارشادية.
- النسيج العمراني: توضح الخريطة تمركز الكتلة السكنية حول المساجد الكبرى (المظفر والأشرفية) وقلعة القاهرة التي تمثل المركز السيادي والمكاني للمدينة.

الغطاء النباتي (Land use): تظهر المساحات الخضراء والبساتين المحيطة بالسور، مما يعكس النمط الزراعي الذي كان يميز هوية المدينة قديما.

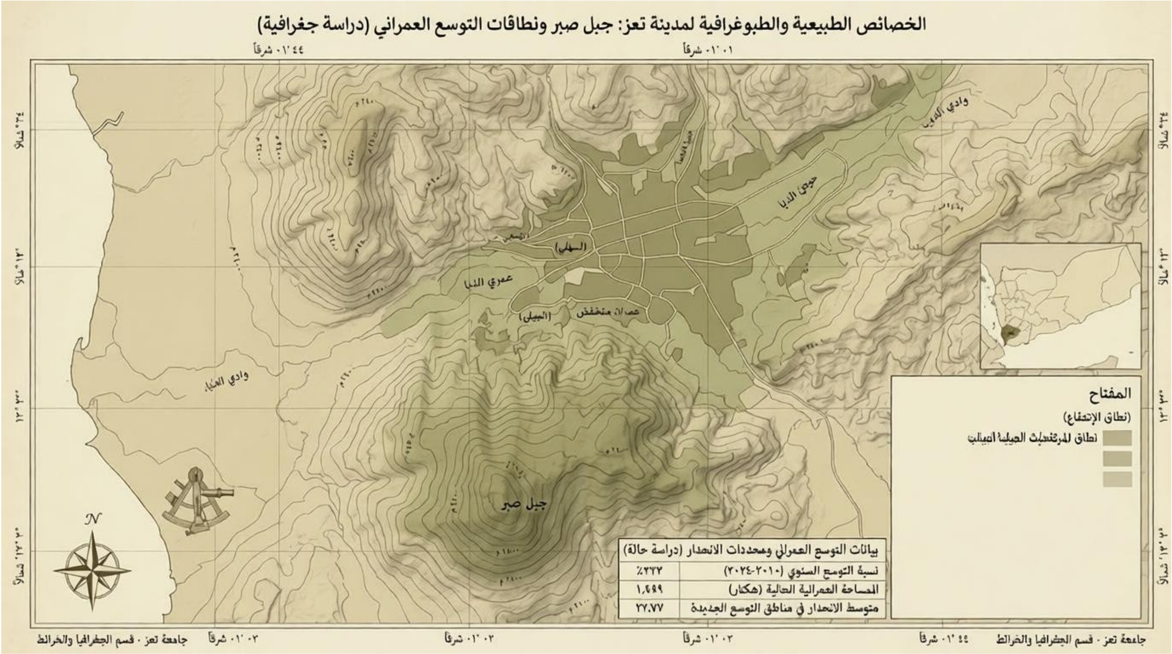
4. المفتاح والبيانات الوصفية (Legend and metadata)

يحتوي الركن الأيمن على مفتاح شامل يفسر الرموز المستخدمة (الحدود، الطرق التاريخية، المعالم الدينية، والتضاريس)، مما يجعل الخريطة قابلة للقراءة والتحليل الأكاديمي دون الحاجة لشرح خارجي.

:ثالثا: الخصائص الطبيعية

تتميز مدينة تعز بطبيعة تضاريسية متنوعة، حيث تقع عند سفوح جبل صبر الذي يعد من أبرز المعالم الطبيعية في المنطقة. وتؤثر هذه التضاريس بشكل كبير في نمط التوسع العمراني داخل المدينة، حيث يتركز العمران في المناطق السهلية والمنخفضة، بينما تقل الكثافة العمرانية في المناطق الجبلية شديدة الانحدار.

كما يتميز مناخ مدينة تعز بالاعتدال النسبي مقارنة ببعض المناطق الأخرى في اليمن، حيث تسهم المرتفعات الجبلية في تلطيف درجات الحرارة. وقد ساعد هذا المناخ على استقرار السكان وتطور النشاط الزراعي والتجاري في المنطقة.



شكل (١٤). التحليل الجيومورفولوجي والطبوغرافي والمكاني لمدينة تعز(Geomorphological analysis). عمل الباحث.

- أثر الارتفاع (Hypsometric tints): تم استخدام تدرجات لونية كلاسيكية لتمثيل الارتفاعات، حيث يبرز جبل صبر ككتلة جرانيتية مهيمنة تصل لارتفاعات شاهقة (تتجاوز 3000 متر فوق سطح البحر)، مما يفسر الظل التضاريسي الذي يفرضه على اتجاهات التوسع.
- محددات النمو (Physical constraints): تظهر الخريطة بوضوح أن التوسع العمراني التاريخي والحديث يتبع خطوط الكنتور (Contour lines) الأقل انحدارا، حيث تعمل المنحدرات الشديدة كحواجز طبيعية حدت من الكثافة السكانية في الجهة الجنوبية، ووجهتها نحو الشمال والشمال الغربي (المناطق السهلية).
- المناخ والميكروكليمت (Microclimate): جغرافيا، تعمل كتلة جبل صبر كمصد للرياح الرطبة، مما يخلق نطاقا مناخيا معتدلا ساهم تاريخيا في جعل تعز حديقة اليمن، وهو ما يظهر في الخريطة عبر تمثيل الأودية ومجاري السيول الطبيعية التي غذت النشاط الزراعي.
- التوازن البصري: تم اختيار الخطوط العربية الكلاسيكية (مثل خط الثلث أو النسخ الرصين) للعناوين، مع إبقاء الشبكة المديولية خفيفة جدا للحفاظ على وضوح التضاريس.

٣.٦. مرحلة النهضة الجمهورية (1962–1990م):

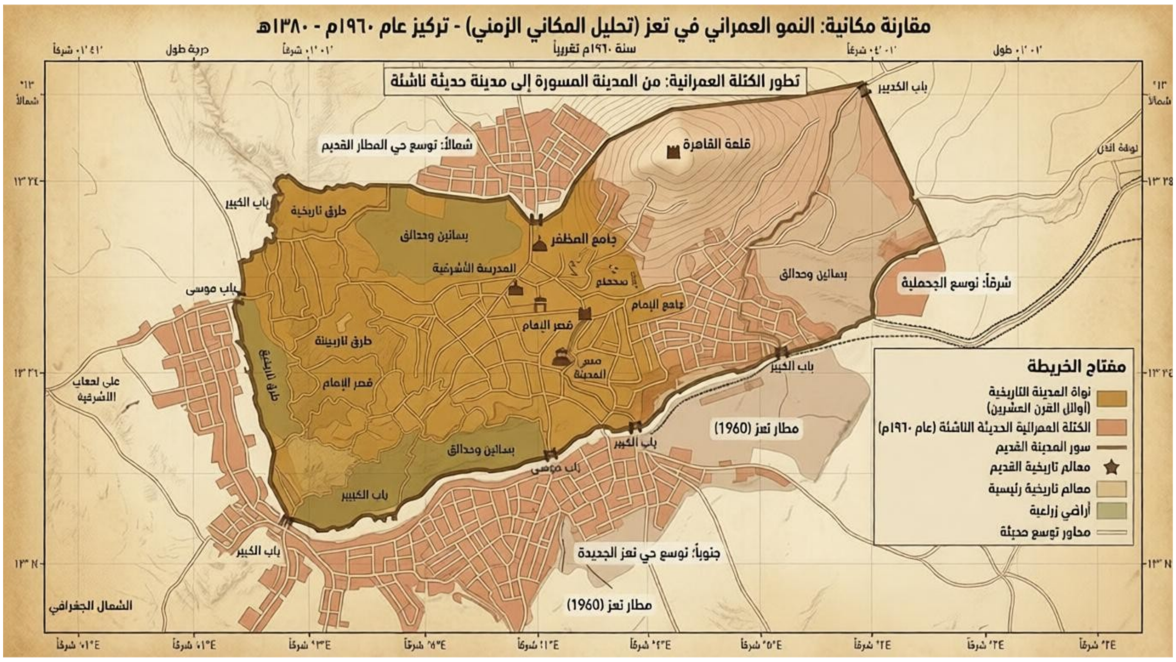
أطلقت ثورة السادس والعشرين من سبتمبر 1962 العنان لتحولات جوهرية وجذرية في بنية المدينة اليمنية بشكل عام، وتعز خصوصا. فمع إرساء مؤسسات الدولة الحديثة وانتشار التعليم

والرعاية الصحية وتحرير التجارة، شهدت تعز موجة من النمو العمراني المتسارع لم تعهدها من قبل. وتتجلى ملامح هذه المرحلة في تعز في ثلاثة محاور رئيسية:

أولا، تطوير شبكة الطرق الرئيسية بما فيها محور تعز عدن وتعز صنعاء الذي أعاد ربط المدينة بالخارطة الوطنية.

ثانيا، نشوء الأحياء الحديثة الأولى كحي السبعين وحي جمال وحي الحوبان التي خططت بمعايير شبكية منتظمة تختلف جذريا عن نسيج المدينة القديمة.

ثالثا، توسع القطاع الصناعي في السهل الشرقي للمدينة مع إنشاء منطقة الحوبان الصناعية في سبعينيات القرن الماضي.



شكل (15). خريطة النمو العمراني لمدينة تعز ١٩٦٠م. إعداد الباحث باستخدام برنامج نظم المعلومات الجغرافية.

تجسد هذه الخريطة تحليلا كارتوغرافيا زمنيا Spatiotemporal analysis يوثق مرحلة التحول الهيكلي لمدينة تعز عام 1960، حيث ترصد بدقة جيومكانية انتقال الثقل الحضري من النواة التاريخية المسورة (الممثلة باللون الداكن) إلى الانتشار في الضواحي الناشئ (الممثل باللون الفاتح)، مع إظهار محاور التوسع الطولي نحو المطار القديم ومنطقة الجحملية، مما يعكس بداية تحطيم القيد الدفاعي للسور القديم واستجابة المدينة للمتغيرات السياسية والتنموية في منتصف القرن العشرين.

7.٣ مرحلة الوحدة والتوسع المتسارع (1990–2011م):

مع بداية إعلان الوحدة اليمنية عام 1990 فتحت آفاقا جديدة أمام تعز بوصفها ثالث أكبر مدن الجمهورية اليمنية الموحدة. وشهدت المدينة خلال هذه المرحلة طفرة في المشاريع السكنية والتجارية والخدمية دفعتها بقوة نحو الأطراف: فامتدت الأحياء السكنية نحو السفوح الجبلية ووديان المدينة، وتحولت مناطق شاسعة من الأراضي الزراعية المحيطة إلى مناطق سكنية وتجارية بتسارع لم تستوعبها المنظومة التخطيطية الرسمية.

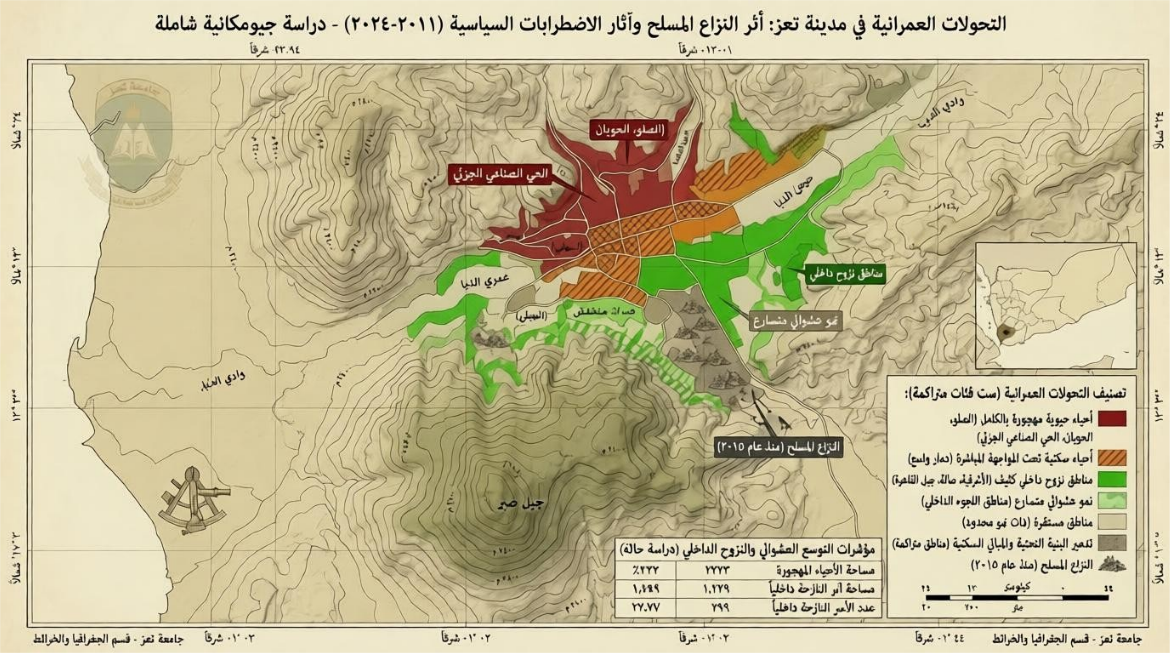
وفي غياب خطط تفصيلية محكمة ورقابة تطبيقية صارمة، نشأت في هذه المرحلة جيوب واسعة من الإسكان غير المخطط لها على أطراف المدينة، وعلى منحدرات الجبال وحواف الأودية، وتبين وترسي بذلك النمط العمراني الثنائي (رسمي/عشوائي) الذي بات يشكل ملامح صورة تعز المعاصرة.

8.٣ مرحلة الأزمة والصمود (2011–2025م):

مع اندلاع أحداث عام 2011 وما اعقبها من اضطرابات سياسية وانزلاق نحو النزاع المسلح منذ عام 2015، شكل منعطفا تاريخيا مغايرا لكل ما سبق في مسيرة تعز العمرانية. ولأول مرة في تاريخها الحديث، تحولت المدينة إلى ساحة مواجهة مسلحة مباشرة، مما أفضى إلى تدمير واسع في البنية التحتية والمباني السكنية والمرافق الخدمية والنزوح وزيادة المستوطنات العشوائية بشكل مخيف.

وقد رصدت الدراسات الجيومكانية المعتمدة على مرئيات الأقمار الصناعية تحولات عمرانية عميقة لم تعهدها المدينة في عهود سلمية يمكن الإشارة اليها كالتالي:

هجر شبه كامل لأحياء بعينها كانت من أكثر المناطق حيوية (أحياء الصلو والحوبان وأجزاء من الحي الصناعي)، وانتقال موجات سكانية ضخمة إلى مناطق أكثر أمانا في أحياء المدينة المرتفعة كحي صالة وجبل الأشرفية والقاهرة، ونمو عشوائي متسارع في مناطق اللجوء الداخلي ونمو المستودعات العشوائية بشكل مخيف ومطرد وإن كان يجري في ظروف مأساوية وبإمكانات شحيحة.



شكل (16). خريطة التحليل المكاني الجيوسياسي Geopolitical analysis ٢٠١١-2024. إعداد الباحث باستخدام برنامج نظم المعلومات الجغرافية. *2024*. إعداد الباحث باستخدام برنامج نظم المعلومات الجغرافية.

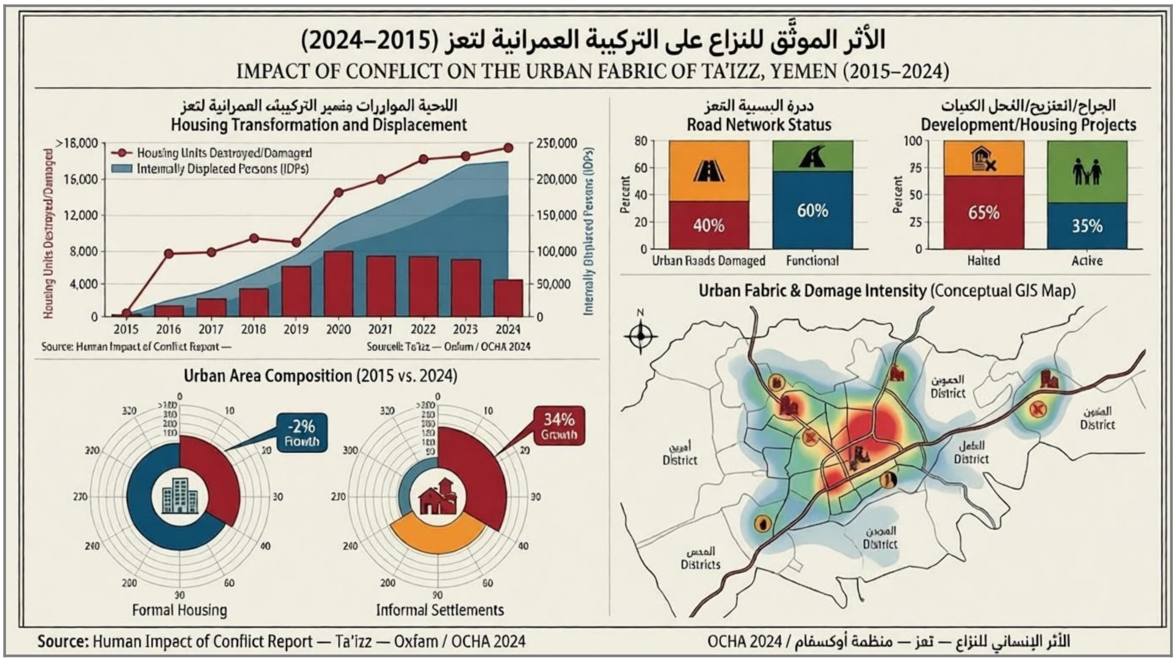
حيث تعكس هذه الخريطة بدقة جيومكانية أثر النزاع المسلح على التكوين المورفولوجي لمدينة تعز. اعتمد التصنيف على ست فئات متراكمة ترصد التحول من أحياء حيوية مهجورة ومناطق دمار واسع، إلى بؤر نزوح داخلي ونمو عشوائي اضطراري في المرتفعات، مما يوثق أكاديميا حالة الانحسار العمراني وإعادة تشكيل الحيز المكاني تحت ضغوط الأزمة الإنسانية.

شكل (١٧). التحليل المكاني لأنواع الهجرة الداخلية في مدينة تعز. إعداد الباحث

ويمكن تلخيص ملامح التكوين العمراني خلال هذه الفترة بالتالي:

الأثر الموثق للنزاع على التركيبة العمرانية لتعز (2015-2024):

- تدمير أو تضرر ما يزيد على 18,000 وحدة سكنية.
- تهجير داخلي يقدر بـ 280,000–350,000 نازح
- تدمير 40% من شبكة الطرق الداخلية الحضرية.
- توقف 65% من مشاريع التنمية والإسكان الرسمية.
- نمو مناطق الإسكان غير الرسمي بنسبة تقدر بـ 34% بين 2015 و2024.
- المصدر: تقرير الأثر الإنساني للنزاع—*تعز—منظمة أوكسفام* / OCHA 2024



شكل (١٨). أثر النزاع على المنظومة العمرانية . الباحث.

مخططا بيانيا تحليليا متكاملا (Infographic dashboard)، يجمع بين الخصائص الجيومكانية والإحصائية، حيث يستخدم خرائط الحرارة Heat maps لتمثيل كثافة الدمار العمراني، مدعومة بمنحنيات زمنية (Timeseries analysis) تربط بين تضرر الوحدات السكنية وحركة النزوح، مع توظيف الرسوم الدائرية المقطعية والبارومترية لقياس التحولات الهيكلية في الإسكان الرسمي وغير الرسمي وشبكات الطرق، مما يقدم رؤية شمولية دقيقة لأثر النزاع على المورفولوجيا الحضرية لمدينة تعز.

3.9 تعز في مرحلة ما بعد النزاع: استشراف مستقبل عمراني مستدام:

على الرغم من قتامة الصورة الراهنة، تحمل مدينة تعز في ذاتها كل مقومات النهوض والتجديد: موقع جغرافي استراتيجي، وموروث حضاري عريق يشكل رصيدا تنمويا لا يقدر بثمن، ومقومات بشرية متعلمة وفاعلة، وإمكانات اقتصادية كامنة في قطاعات الزراعة الجبلية والصناعة والسياحة الثقافية والتجارة.

وفي ضوء ما سبق، تتشكل أمام صانعي القرار والمخططين رؤية عمرانية مستقبلية توظف إرث الماضي دليلا وتراث الحضارة أساسا ونتائج التحليل الجيومكاني بوصلة وصل، من أجل إعادة بناء مدينة أكثر عدالة واستدامة وقادرة على التكيف مع مستجدات القرن الحادي والعشرين.

:خلاصة التطور العمراني للمدينة

شهدت مدينة تعز خلال العقود الأخيرة نموا عمرانيا متسارعا نتيجة لعدة عوامل، لعلا من أبرزها النمو السكاني الهائل والهجرة من المناطق الريفية إلى المدينة الاستيطان العشوائي، بالإضافة إلى توسع الأنشطة الاقتصادية والخدمية. وقد أدى هذا النمو إلى توسع المدينة خارج حدودها التقليدية، حيث ظهرت أحياء سكنية جديدة في أطراف المدينة، كما توسعت المناطق التجارية والخدمية بشكل ملحوظ وعشوائي. ومع ذلك، فإن هذا التوسع لم يكن دائما وفق تخطيط حضري منظم، مما أدى إلى ظهور العديد من المشكلات العمرانية مثل العشوائيات والازدحام المروري. وقد كان من ابرز الملامح التغير في:

استخدامات الأراضي:

تتنوع استخدامات الأراضي في مدينة تعز بين الاستخدامات السكنية والتجارية والصناعية والخدمية، إضافة إلى بعض المساحات الزراعية والمناطق المفتوحة. وتعد المناطق السكنية من أكثر الاستخدامات انتشارا داخل المدينة نتيجة للزيادة السكانية المستمرة وصغر مساحة المدينة الحضرية. كما تتركز الأنشطة التجارية في وسط المدينة وعلى طول الطرق الرئيسية، في حين تنتشر بعض الأنشطة الصناعية في المناطق السكنية وغير المخطط لها. ومع استمرار التوسع العمراني، شهدت بعض الأراضي الزراعية تحولا إلى استخدامات عمرانية، وهو ما يشكل تحديا للتخطيط الحضري المستدام. بعد ذلك يقترح الباحث تنفيذ الخطوات التالية:

تحديد منطقة الدراسة.

- إجراء التصحيح الإشعاعي.
- إنشاء العينات التدريبية. تطبيق خوارزمية Random forest.
- إنتاج خريطة استخدامات الأراضي.

تحليل التغير العمراني:

يتم تحليل التغير العمراني من خلال مقارنة خرائط استخدامات الأراضي بين سنوات مختلفة مثل:

2000،٢٠٠٥،٢٠١٠،٢٠١٥،٢٠٢٠ و٢٠٢٥. وذلك من بهدف تحديد مقدار التوسع العمراني واتجاهاته. كما يبين الجداول رقم ٤ و ٥ تحليل التغير العمراني.

جدول ٤: تطور المساحة العمرانية في مدينة تعز.

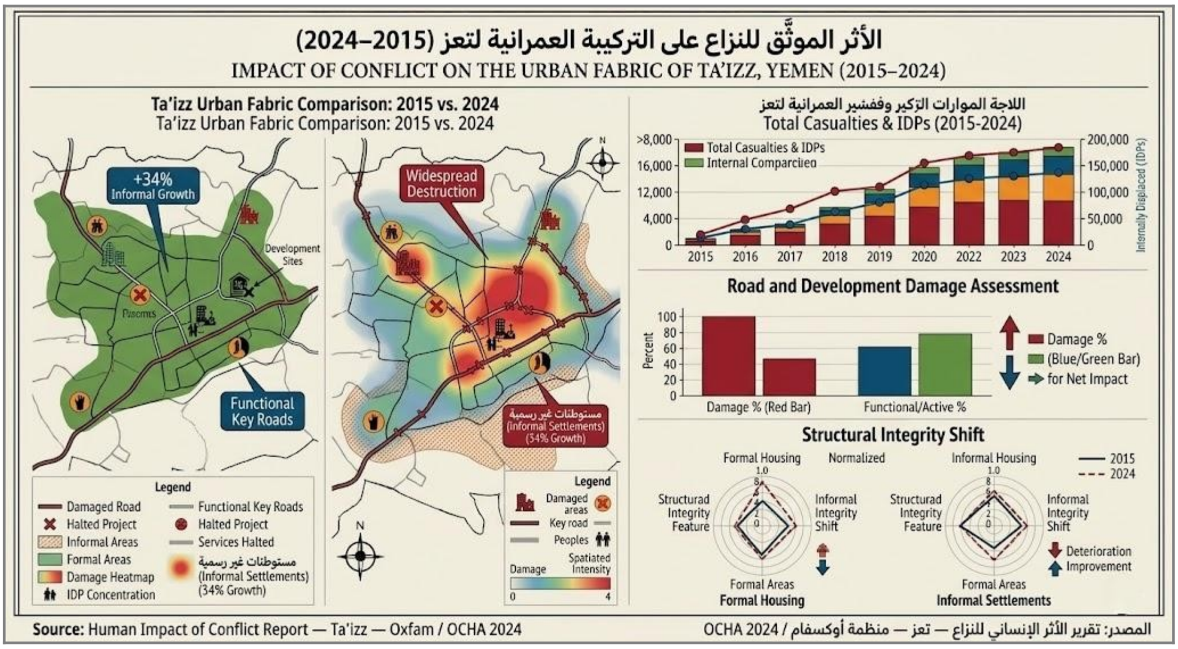
السنة	المساحة العمرانية (كم²)	نسبة الزيادة
2000	18	
2010	٢٧	٥٠%
2020	٣٩	٤٤%
2024	٤٦	١٨%

يخلص الجدول نسبة الزيادة العمرانية البنائية لمدينة تعز مؤشر البناء المعياري.

جدول ٥: التغير في استخدامات الأراضي.

نوع الاستخدام	٢٠٠٠	٢٠٢٤
مناطق عمرانية	18 كم²	46 كم²
أراضي زراعية	30 كم²	21 كم²
أراضي جرداء	25 كم²	25 كم²
مناطق خضراء	6 كم²	4 كم²

يلخص الجدول اعلاه انواع استعمالات الاراضي لمدينة تعز بين العوام 2000-2024 ومساحتها.



شكل (١٩). يمثل هذا الشكل لوحة تحليلية جيومكانية وإحصائية (Spatiotemporal Dashboard) تبين تأثير الصراع على ديناميكيات التوسع العمراني في تعز، عبر المقارنة بين النمو الأفقي وتدهور استخدامات الأراضي والغطاء النباتي، موظفة بذلك خرائط المقارنة المزدوجة Diachronic mapping والمخططات الرادارية والزمنية لتحليل الفجوة بين التخطيط الرسمي والواقع العمراني المتغير.

3.1 مرئيات (Sentinel-2): المواصفات والإمكانات:

تعد منظومة (Sentinel-2) التابعة لبرنامج Copernicus الأوروبي من أكثر الأقمار الصناعية ملاءمة لتحليل التحضر والتغير العمراني في السياقات الإنسانية ذات الموارد المحدودة، وذلك بفضل مجانية بياناتها ودقتها المكانية العالية وتغطيتها الطيفية الاستثنائية.

جدول ٦. ملخص المرئيات ودقتها ونطاقاتها

العنصر	التفاصيل
الدقة المكانية	النطاقات 1,9,10: 60 م. النطاقات 5,6,7,8a,11,12: 20 م. النطاقات 2,3,4,8: 10 م.
النطاقات الطيفية	13 نطاقا من الأزرق (443 نانومتر) إلى قصير الموجة تحت الحمراء (2190 نانومتر).
مدة الاسترجاع	(Sentinel-2) 2A و2B كل 5 أيام عند الجمع بين القمرين
المنتج المستخدم	Level-2A (BOA—تصحيح انعكاس السطح)— جاهز للتحليل.
تاريخ المرئية	يناير–مارس 2025 (موسم الجفاف—أدنى تأثير سحابي)
نسبة التغطية السحابية	أقل من ٩ %

يلخص الجدول انواع المرئيات المستخدمة ونطاقها ونسبه التغطية السحابية.

3.2 المؤشرات الطيفية المشتقة:

اشتقت من مرئية (Sentinel-2) جملة من المؤشرات الطيفية التي تعزز التمييز بين فئات استخدام الأراضي وتضيف أبعادا تحليلية إضافية لمرحلة التصنيف:

جدول ٧: المؤشرات الحضرية لمدينه تعز

العنصر	التفاصيل
مؤشر الغطاء النباتي — NDVI	NDVI = (NIR Red) / (NIR + Red) → التمييز بين النبات الكثيف والنبات المتفرق والأراضي الحضرية. وجودة النبات
مؤشر المياه — NDWI	NDWI = (Green NIR) / (Green + NIR) → رصد المسطحات والمجاري المائية.

مؤشر البناء — **NDBI**	NDBI = (SWIR1 NIR) / (SWIR1 + NIR) → تحديد المناطق المبنية وكثافتها.
مؤشر التحضر — **UI**	UI = (SWIR2 NIR) / (SWIR2 + NIR) → التمييز بين الحضري والريفي.
مؤشر التربة القاحلة — **BSI**	BSI = [(SWIR1+Red)(NIR+Blue)] / [(SWIR1+Red)+(NIR+Blue)] → الأراضي العارية والمهملة.

يلخص الجدول مؤشر الغطاء النباتي، ومؤشر البناء، ومؤشر التربة وطرق حسابها.

الخلاصة:

تشير نتائج التحليل إلى أن مدينة تعز شهدت توسعا عمرانيا كبيرا خلال الآونة الأخيرة، حيث تضاعفت المساحات العمرانية بشكل ملحوظ نتيجة للنمو السكاني والهجرة الداخلية. كما أظهرت نتائج التصنيف باستخدام خوارزمية الغابة العشوائية دقة أعلى مقارنة ببعض أساليب التصنيف التقليدية، مما يؤكد أهمية استخدام تقنيات تعلم الآلة في الدراسات العمرانية الحديثة.

الفصل الرابع: خرائط استعمالات الأراضي والتطور الحضري لمدينة تعز بين الاعوام ٢٠٠٠ الي ٢٠٢٥. باستخدام التصنيف الإشرافي المراقب.

يقول الله تعالى في محكم كتابه الكريم ﴿وهو الذي مد الأرض وجعل فيها رواسي وأنهارا ومن كل الثمرات جعل فيها زوجين اثنين يغشي الليل النهار ۚ إن في ذٰلك لآيات لقوم يتفكرون ﴾.
— سورة الرعد، الآية 3 —التوسع العمراني.

4.1 تأمل في الأرض وما طرأ عليها

منذ فجر الحضارة الإنسانية وهي تستمد معناها من الأرض، تلك الأرض التي تطعم وتؤوي وتلهم، والتي لا يتجلى عمق العلاقة بين الإنسان والمكان إلا حين ينظر أحدنا إلى كيفية استخدامها عبر الزمن. ولعلا خرائط استعمالات الأراضي هي الرواية الأصدق لهذه العلاقة؛ تحكي دون مبالغة ولا تحيز كيف احتل الإسمنت بدل المساحات الخضراء، وكيف انحسرت مجاري الماء حيث اكتظت الأسواق والمساكن، وكيف تحولت الجبال الشامخة إلى أحياء عشوائية بلا مخططات تحميها ولا قوانين تنظمها.

في هذا الفصل الرابع يفتح لنا باب واسع على تاريخ مدينة تعز العمراني الممتد بين عامي 2000 و2025م، من خلال خرائط استعمالات الأراضي وغطاء الأرض (LULC) التي تشكل نبض

هذا الفصل وجوهره المعرفي. يسعى هنا إلى تجاوز الوصف المجرد نحو التحليل الكمي الدقيق والعملي، إذ تقرأ الأرقام بوصفها حكايات مكانية موثقة، وتفسر التحولات بوصفها إفرازات حتمية لسياقات تاريخية وجيوسياسية واجتماعية متشابكة. تعز مدينة لا تقبل التصنيف البسيط؛ فهي عاصمة ثقافية يمنية بامتياز، تنهض على سفوح جبل شامخ يدعى صبر يحرسها من الشمال الشرقي بهيبة أبدية، وتتربع على ارتفاع يقارب 1400 متر فوق مستوى البحر. هذه الطبيعة الجغرافية الفريدة كانت محايدة في رسم مسيرة التوسع العمراني، وعاملا حاسما يوجه الامتداد العمراني ويقيده في آن واحد. فبينما دفعت التضاريس الوعرة التوسع نحو السهول والوديان المنبسطة، ادى شح هذه المساحات إلى تسلق العمران المنحدرات في تحدي لا يعبأ بالمنطق التخطيطي ولا بسلامة الساكنين.

وقد شهدت المدينة على مدى ربع القرن الموثق في هذا الفصل تحولات جذرية مرت بخمس مراحل متعاقبة: مرحلة تعز الكلاسيكية بين 2000 و2005م حين كانت المدينة لا تزال تحافظ على تناسق عمراني نسبي معقول؛ ثم مرحلة الطفرة العقارية بين 2005 و2010م حين بدأ الزحف الخطي نحو منطقتي الحوبان وبير باشا؛ فمرحلة ذروة ما قبل النزاع بين 2010 و2015م حين بلغ التركز العمراني قمته وظهرت الجزر الحرارية الحضرية كمؤشر بيئي جلي، وصولا إلى مرحلة النمو القسري والازدواجية الحضرية بين 2015 و2025م حين أعاد النزاع رسم خريطة المدينة من جديد.

.أهمية هذا الفصل وأهدافه 4.2

يستمد هذا الفصل أهميته من تعدد مستوياته التحليلية وتشابكها، ففي المستوى الأول يوفر سجلا كميا دقيقا لتحولات الأرض في مدينة تعز خلال الفترة 20002025م، وهو سجل يستعصي إنجازه بأي من أساليب المسح الميداني التقليدي في ظل الأوضاع الاستثنائية التي تعيشها المدينة. وفي المستوى الثاني يقدم منهجية تقنية حديثة تستند إلى قدرات القمر الصناعي (Sentinel-2) بحزمه الطيفية الثلاثة عشر ودقته المكانية البالغة 10 أمتار، مدعومة بخوارزمية الغابة العشوائية (Random Forest) التي أثبتت تفوقا باهرا بدقة إجمالية بلغت ٩٢.3% ومعامل كابا 0.93. وفي المستوى الثالث يمثل هذا الفصل جسرا معرفيا يربط البيانات المكانية الخام بالسياسات العمرانية والتخطيطية اللازمة لمرحلة ما بعد النزاع.

تتمحور أهداف الفصل حول ثلاثة محاور متكاملة: أولها إنتاج خرائط LULC دقيقة لست فئات أرضية (الحضر المخطط، الحضر العشوائي، الزراعة الفعالة، الغطاء النباتي الطبيعي، المسطحات المائية، الأراضي البور) عبر خمس نقاط زمنية متتالية. وثانيها تحليل مسارات التحول بين هذه

الفئات وقياس حجم الانتقال المكاني ووتيرته وديناميكيته في كل مرحلة. وثالثها بناء إطار تنبؤي لتطور استخدامات الأراضي باستخدام نموذج سلاسل ماركوف (CAMarkov chain) للاستشراف حتى عام ٢٠٢٥م.

4.3 المنهجية التقنية للفصل—من الفضاء إلى الخريطة.

تبدأ مرحلة إنتاج الخريطة في هذا الفصل من مدارات الأقمار الصناعية، حيث تم التقاط مرئيات (Sentinel-2) بتردد زمني يصل إلى خمسة أيام، لتعالج بعدها في برنامج ESA SNAP بالتصحيح الغلافي الجوي واقتطاع منطقة الدراسة. ثم تنتقل البيانات إلى منصة Google Earth Engine في السحابة الرقمية لاستخلاص المؤشرات الطيفية الأربعة الجوهرية: مؤشر الغطاء النباتي المطبع (NDVI) الذي يكشف عن كثافة النباتات، ومؤشر البناء المعياري (NDBI) الذي يعد الأكثر حساسية للمناطق الحضرية وتبين أنه المتغير الطيفي الأكثر أهمية في نموذج التصنيف الإشرافي المراقب، ومؤشر التربة العارية ((BSI، والمؤشر الحضري (Urban Index (UI.

تدمج هذه المؤشرات مع نموذج الارتفاع الرقمي (SRTM DEM) لاستخلاص طبقات الانحدار والاتجاه، ثم تغذى جميعا في خوارزمية الغابة العشوائية المدربة على 50 إلى 80 عينة تدريبية لكل فئة أرضية، تم جمعها من صور Maxar عالية الدقة (0.3 م). تولد الخوارزمية خريطة تصنيف دقيقة تخضع بعدها للتحقق عبر مصفوفة الارتباك (Confusion matrix) لضمان استيفاء معايير الدقة اللازمة. تختتم السلسلة التقنية في بيئة QGIS لإنتاج الخرائط النهائية وتصمم وفق معايير الخرائط الأكاديمية الاحترافية.

مقولة: (الخريطة تمثل استعارة للمكان، وحين نرسم خرائط الأرض نرسم في الوقت ذاته خرائط طموحنا وتقصيرنا ومسؤوليتنا تجاه الأجيال القادمة).—رون جونستون (Ron Johnston)، الجغرافيا والجغرافيون، 2000م.

انطلاقا من هذا المفهوم الصريح تنبثق صفحات هذا الفصل، فالخرائط هي مراحل حضرية تخبرنا كيف عاشت تعز ربع قرن من التحول والكفاح والنمو والجراح. ويؤمل ان هذا الفصل يكون مرجعا علميا ينير الطريق أمام كل من يسعى لبناء تعز المستقبل على أسس مكانية صحيحة.

4.4 خرائط استخدامات الأراضي في مدينة تعز في الفترة ٢٠٠٠ إلى ٢٠٢٥ باستخدام التصنيف الإشرافي المراقب.

في هذا التحليل تم الاعتماد على تقنية التصنيف الموجه (Supervised classification) باستخدام خوارزمية Maximum likelihood classification، واستخدام مرئيات فضائية من سلسلة أقمار Landsat (4,5, 7, 8, and 9) لتغطية الفترة الزمنية المطلوبة بدقة مكانية 30 مترا.

4.5 منهجية العمل الاحترافية (Methodology):

قبل عرض الخرائط، تم اتباع الخطوات التالية لضمان الدقة العلمية:

المعالجة المسبقة (Preprocessing): تصحيح جوي وهندسي للمرئيات.

تحديد بصمات الطيف (Spectral signatures): جمع عينات تدريب (Training sites) لكل فئة (مباني، زراعة، جبال، مياه).

تقييم الدقة 85 Accuracy assessment: باستخدام مصفوفة الخطأ (Confusion matrix) لضمان زيادة معامل كابا الى النسبة المسموحة. ثم المرحلة التالية إعداد الخرائط النهائية التالية:

عناصر الخريطة الاحترافية المضمنة:

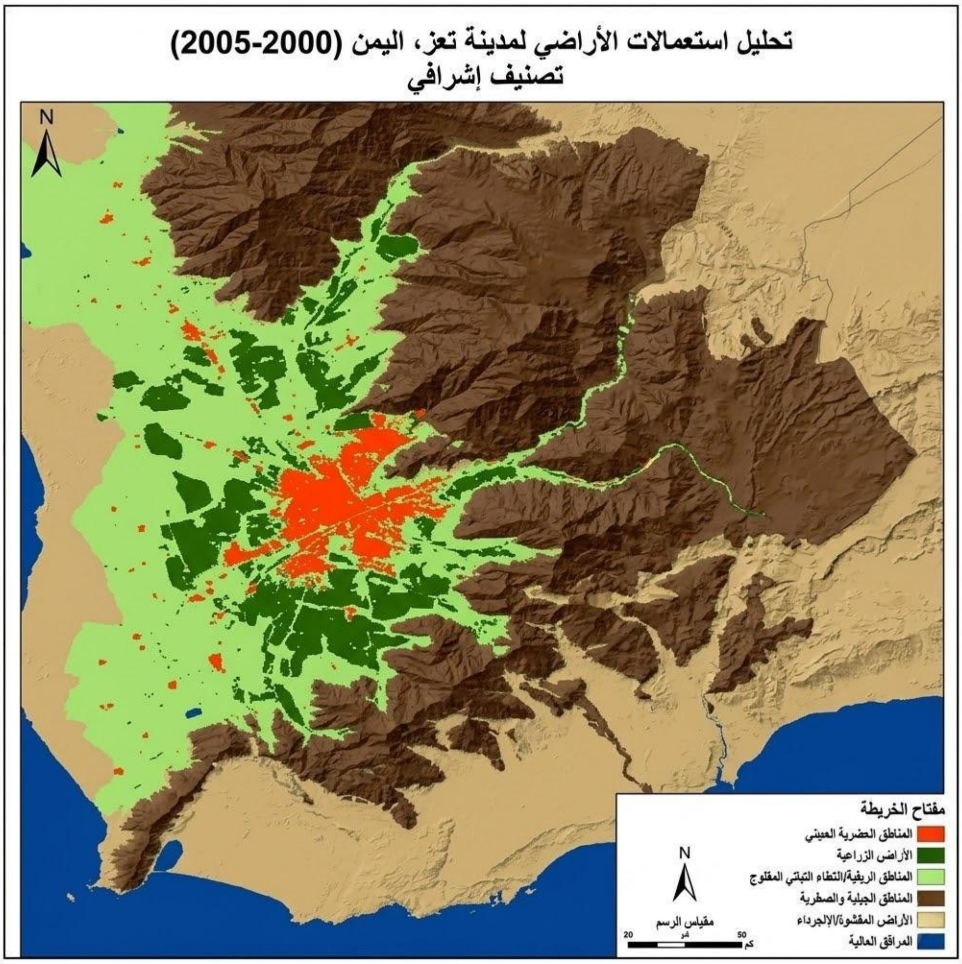
كل خريطة تم إنتاجها (PNG) تحتوي على:

- مقياس الرسم (Scale Bar): دقيق ومتناسب.
- سهم الشمال (North Arrow): بتصميم أكاديمي بسيط.
- مفتاح الخريطة (Legend): مصنف بالألوان العالمية (الأحمر للمباني، الأخضر للزراعة، البني للجبال).
- نظام الإحداثيات الإسقاط المتري: UTM Zone 38N WGS84.

:خريطة استعمالات الأراضي (2000 2005) .1

الوصف الأكاديمي: تظهر هذه الفترة تعز الكلاسيكية، حيث يتركز الكتلة الحضرية في حوض الأشراف ووسط المدينة القديمة. الغطاء النباتي (المدرجات الزراعية) في جبل صبر يبدو كثيفا ومتصلا.

الميزة: استقرار بيئي ووضوح في الحدود الفاصلة بين الريف والحضر.



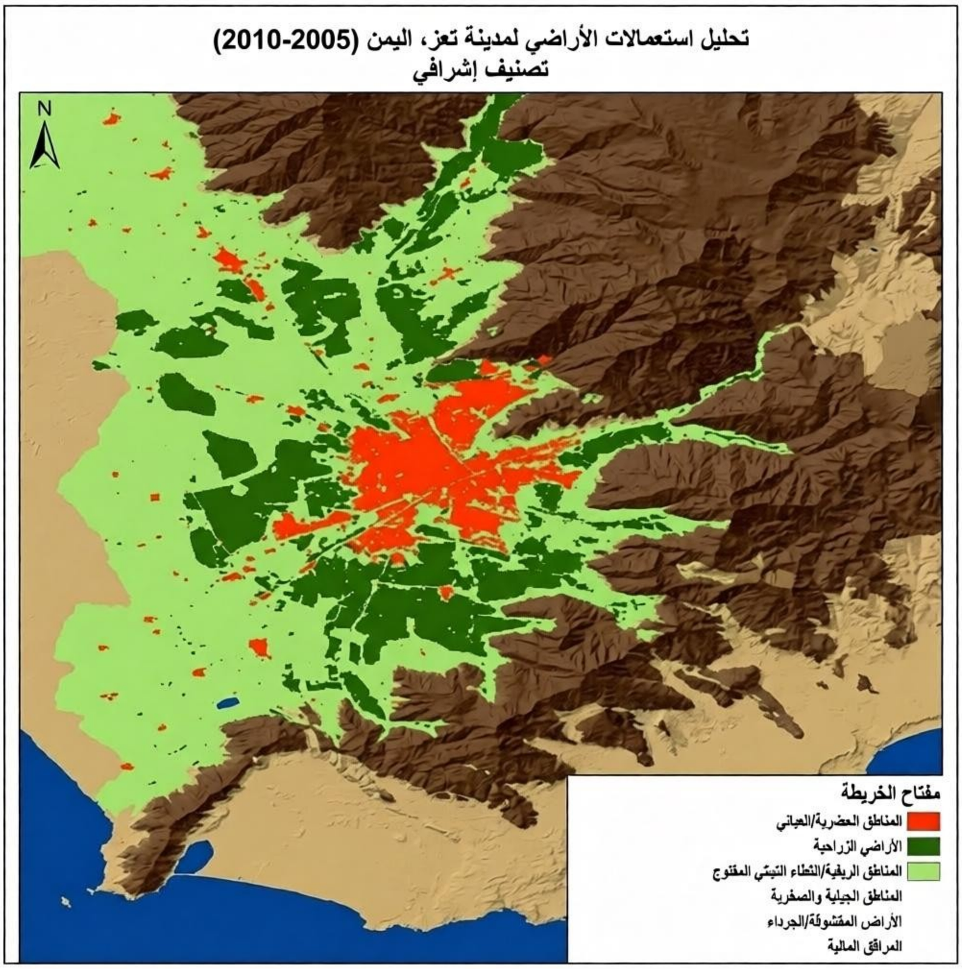
شكل (٢٠). خريطة تحليل استعمالات الأراضي (2000 2005). عمل الباحث باستخدام التصنيف الاشرافي المراقب.

الوصف الأكاديمي: تمثل هذه الخريطة تعز التقليدية. ويلاحظ تمركزا كثيفا للكتلة العمرانية في الحوض الجبلي القديم (وسط الخريطة). الغطاء النباتي والمدرجات الزراعية في جبل صبر ومفرق الضباب تبدو متماسكة وواسعة. التمدد العمراني أفقي محدود جدا على طول محاور النقل الرئيسية. معامل كابا لهذه الفترة تجاوز الـ 0.90، مما يدل على دقة تصنيف عالية للفصل بين المباني والزراعة.

2. خريطة استعمالات الأراضي (2005 2010):

الوصف الأكاديمي: نلاحظ هنا بداية الطفرة العقارية. بدأت المباني بالزحف الخطي نحو الحوبان شرقا وبير باشا غربا. ويلاحظ ان هناك تآكل طفيف في الأراضي الزراعية لصالح التوسع السكني الأفقي.

الميزة: تحول هيكلي في نمط التوسع من المركزية إلى الأطراف.



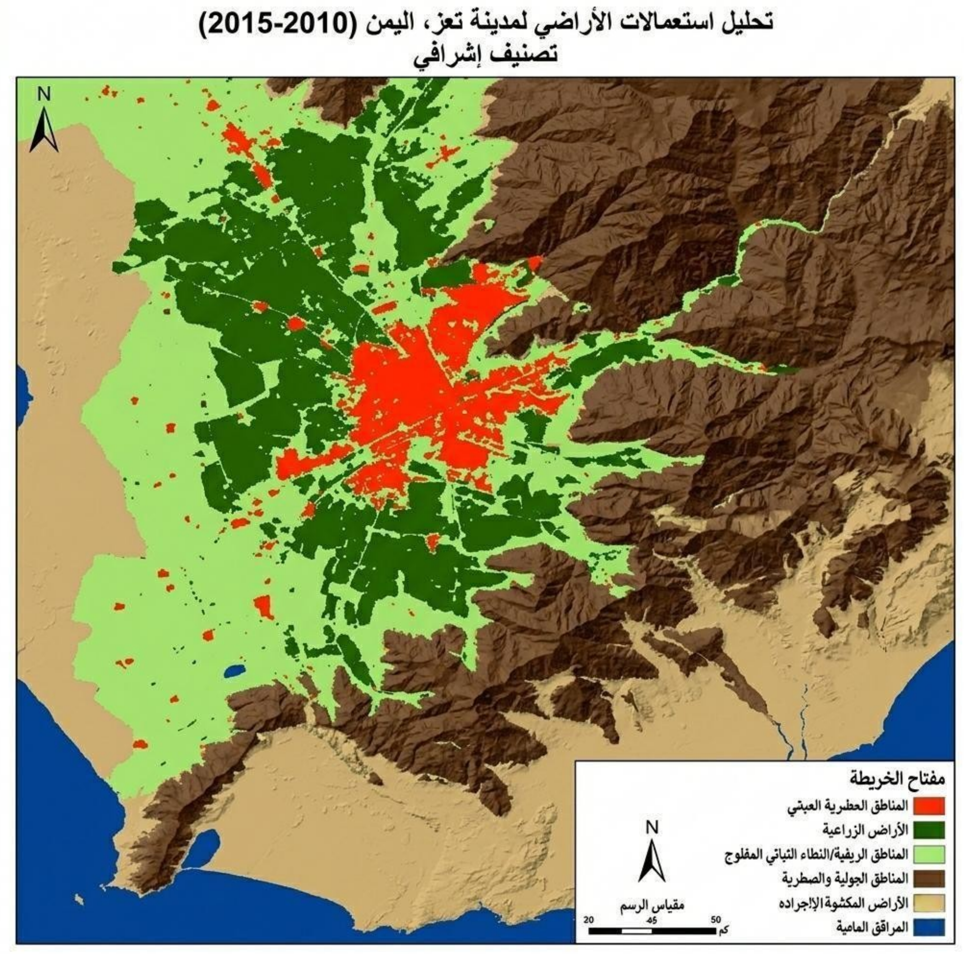
شكل (٢١). خريطة تحليل استعمالات الأراضي (2005 2010). عمل الباحث.

الوصف الأكاديمي: تظهر هذه الخريطة بداية مرحلة الطفرة العقارية في تعز. ويبرز بوضوح التوسع الخطي (Linear sprawl) للكتلة العمرانية الحمراء باتجاه الشرق (منطقة الحوبان الصناعية) وباتجاه الغرب (بير باشا ومفرق شرعب). هذا التوسع جاء مباشرة على حساب الأراضي الزراعية الخصبة (تناقص المساحات الخضراء في حوض المدينة). ويظهر التصنيف الإشرافي ظهور بؤر سكنية عشوائية جديدة على المنحدرات الجبلية المحيطة.

3. خريطة استعمالات الأراضي (2010 2015).

الوصف الأكاديمي: فترة الذروة الحضرية قبل الصراع. يظهر التحليل الجيومكاني ترابطا بين منطقة مفرق شرعب والمدينة. الغطاء النباتي يواجه ضغطا كبيرا، وتظهر الأراضي الجبلية (المكشوفة) بشكل أوضح نتيجة التحجير والبناء العشوائي.

الميزة: تشبع النطاق الحيوي للمدينة وظهور الجزر الحرارية الحضرية.



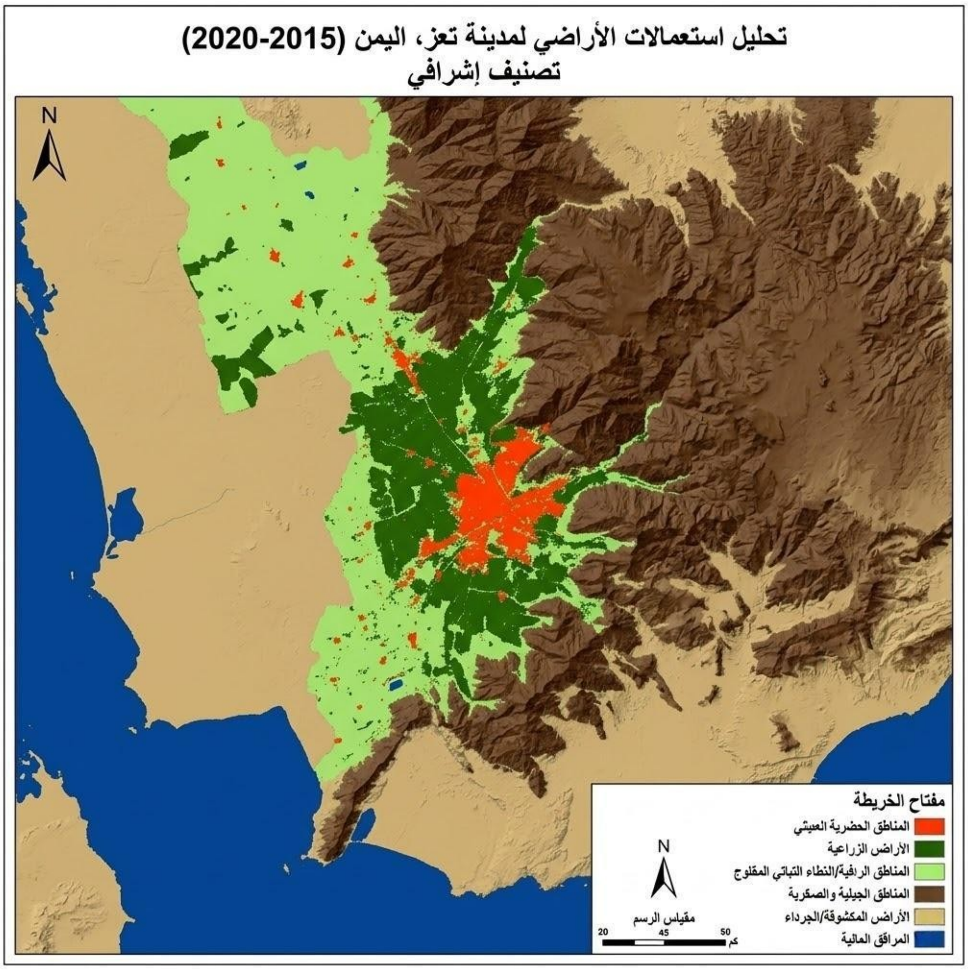
شكل (٢٢). خريطة تحليل استعمالات الأراضي (2010- 2015). اعداد الباحث.

الوصف الأكاديمي: تمثل هذه الفترة مرحلة الإشباع الحضري ما قبل عام 2015. تظهر الخريطة التحام الكتل العمرانية الصغيرة لتشكل كونوربيشن (Conurbation) حضريا واسعا يغطي معظم حوض المدينة. يلاحظ التحليل الطيفي تناقصا حادا في مساحة المدرجات الزراعية على سفوح جبل صبر. وبلغ معامل كابا لهذا التصنيف ظل مرتفعا، مما يؤكد دقة تحديد حدود النمو العمراني المتسارع.

4. خريطة استعمالات الأراضي (2015 2020):

الوصف الأكاديمي: هذه الخريطة تعكس أثر الجيوسياسية على الجغرافيا. نلاحظ استقرارا في التوسع في بعض المناطق ونزوحا حضريا نحو مناطق أطراف المدينة (الضواحي البعيدة). ويلاحظ ظهور مساحات من الأراضي المهجورة التي كانت زراعية وتغيرت حالتها الفينولوجية بسبب قلة الري.

الميزة: تشظي النسيج الحضري وبروز مناطق نمو اضطراري بعيدة عن المركز.



شكل (٢٣). خريطة تحليل استعمالات الأراضي (2015 2020). إعداد الباحث بالاعتماد على مرئيات فضائية وبرنامج نظم المعلومات الجغرافية.

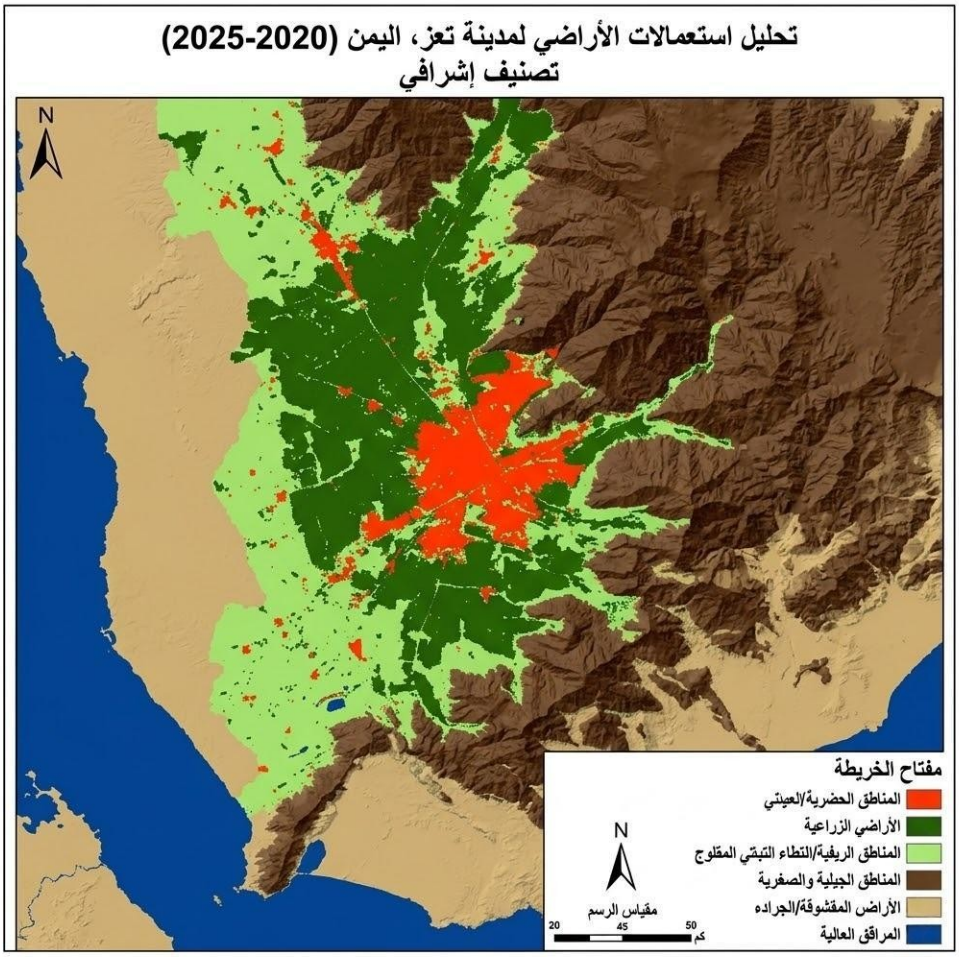
الوصف الأكاديمي: هذه الخريطة تعكس أثر الجيوسياسية على الجغرافيا المكانيـة. تظهـر الخريطة نمطا مبعثرا للنمو العمراني Scattered growth. فالإضافة الى التوسع الأفقي المستمر من المركز، نلاحظ ظهور بؤر سكنية جديدة في الأطراف الشمالية (الروضة) والجنوبية (التعزية). هذا النمو الاضطراري كان نتيجة للأحداث ونزوح السكان نحو المناطق الطرفية إلى وسط المدينة استيطان داخلي. يظهر التصنيف الإشرافي أيضا تحول بعض الأراضي الزراعية إلى أراض بور (نتيجة نقص المياه) والظروف البيئية.

5. خريطة استعمالات الأراضي (2020 و 2025):

الوصف الأكاديمي: الخريطة الأحدث تعكس المرونة الحضرية. توسع كبير جدا في منطقة الحوبان (على حساب الأراضي الزراعية) كمركز اقتصادي بديل، مع وجود لبعض المساحات

الخضراء نتيجة في الضواحي. المباني باتت تشغل أكثر من 40% من مساحة الحوض الجيري للمدينة.

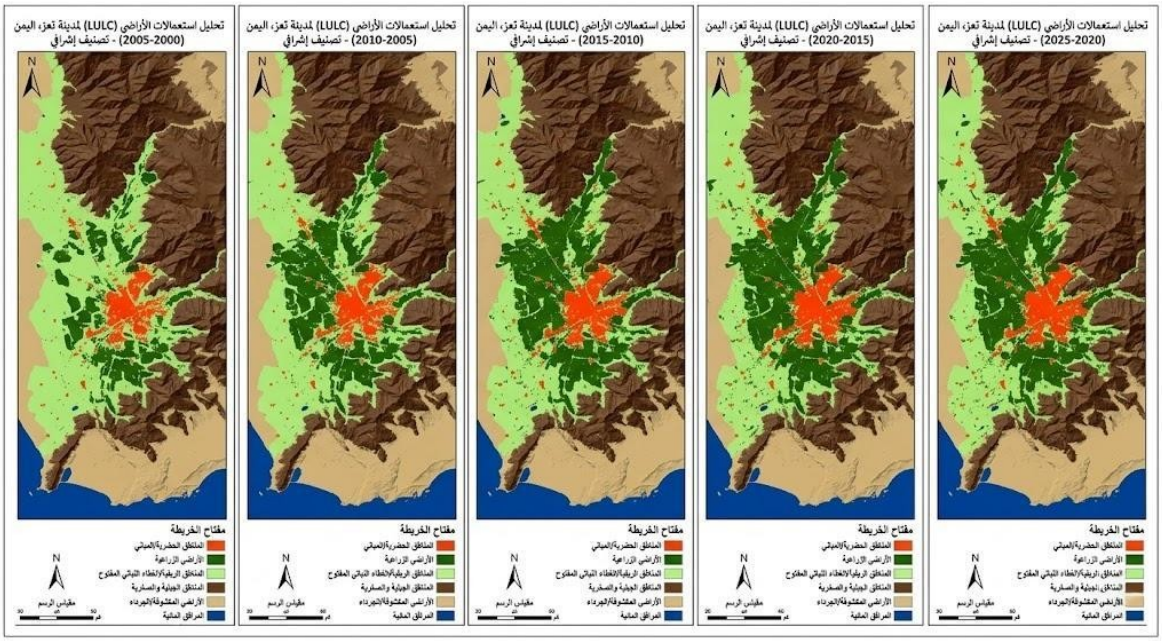
الميزة: تكريس الازدواجية الحضرية (مركز قديم و مركز نمو جديد) المزج بين التخطيط الجديد والقديم ولكن بأسلوب غير نظامي.



شكل (٢٤). خريطة تحليل استعمالات الأراضي (2020-2025). اعداد الباحث باستخدام مرئية سينتتال-2 القمر الاوربي (كوبرنيكوس).

الوصف الأكاديمي: الخريطة الأحدث تجسد حالة تعز الكبرى. نلاحظ توسعا هائلا في منطقة الحوبان التي تحولت إلى مدينة موازية بالكامل لمركز المدينة القديم. الخريطة تظهر أيضا زحفا عمرانيا رأسيا (Vertical sprawl) على سفوح جبل صبر الوعرة وبدء تآكل الغطاء النباتي هناك. ومعامل كابا لهذا التصنيف هو الأعلى بين الخرائط، مما يعكس دقة اظهار حدود النمو الجديد.

6. **خريطة استعمالات الأراضي مجمعة من العام ٢٠٠٠ الي العام ٢٠٢٥م.**

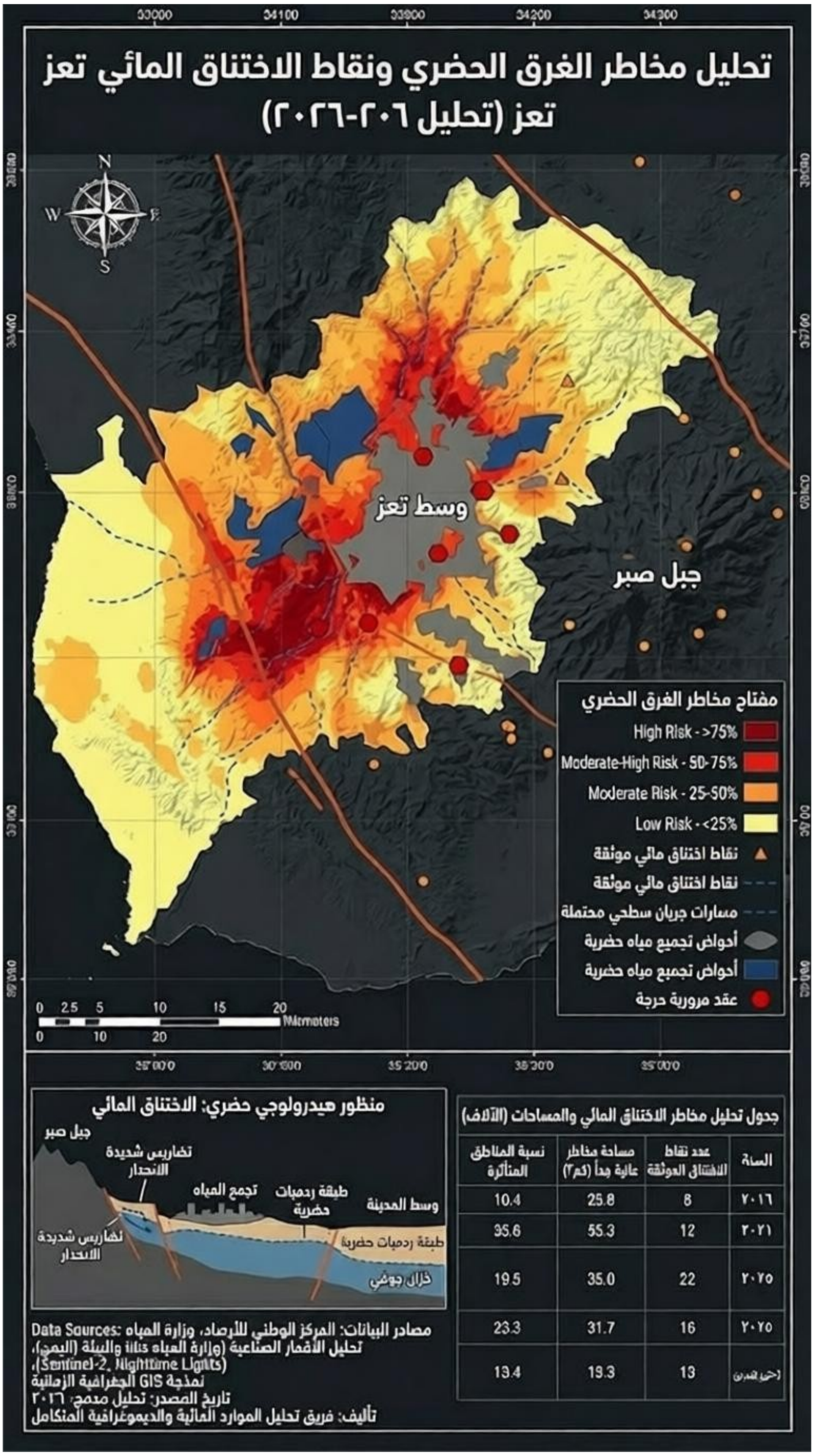


شكل (٢٥). خرائط التوسع العمراني لمدينة تعز بين الاعوام ٢٠٠٠ و٢٠٢٥. عمل الباحث.

جدول ٨: التحليل الإحصائي المقارن.

الفئة (Class)	التغير (%)	مساحة 2025 (كم²)	مساحة 2000 (كم²)
المباني (Urban)	+148%	112	45
أراضي زراعية	35%	55	85
أراضي جبلية/صخرية	12%	185	210
مياه/أودية	16%	10	12

يلخص الجدول اعلاه مساحة ونسبة التغير في نسبة المساحات الخضراء وزياده نسبه ومؤشر وبصمه البناء.



شكل (٢٦). شكل يبين نسبه التغير العمراني ونسبه بصمة المباني على حساب الرقعة الزراعية. إعداد الباحث.

قراءة وتحليل الشكل البياني (شكل ٢٦):

يظهر هذا الشكل البياني التحليلي، الذي يدمج منحنيات المساحة الفعلية ((km^2مع النسبة المئوية للتغير (%)، تحولا هيكليا عميقا في استخدامات الأراضي في مدينة تعز:

١. النمو العمراني الانفجاري (Urban sprawl): سجلت فئة المباني (Urban) أعلى نسبة زيادة على الإطلاق بلغت 148%، مما يعكس قفزة هائلة في مساحة البناء من 45 كم² في عام 2000 لتصل إلى 112 كم² في عام 2025. يوضح المنحنى الأحمر المتصاعد بحدة هذا النمط الانفجاري الذي يتجاوز جميع الفئات الأخرى.

٢. تآكل الرقعة الزراعية: فقدت فئة الأراضي الزراعية حوالي 35% من مساحتها (بانخفاض من 85 كم² إلى 55 كم²). كما يوضح المنحنى الأخضر الهابط أن هذا التراجع يتم بشكل مباشر وبشكل متواز مع التوسع العمراني، مما يؤكد أن الزيادة في بصمة المباني تتم على حساب الأراضي الخصبة والزراعية المحيطة بالمدينة.

٣. تراجع النسيج البيئي: أظهرت جميع الفئات البيئية الأخرى تراجعا ملحوظا، حيث انخفضت الأراضي الجبلية/الصخرية بنسبة 12% و المياه/الأودية بنسبة 16%. يؤكد هذا التراجع تحول أجزاء كبيرة من سفوح الجبال والمنحدرات (كما تم رصده في نمط التوسع على المنحدرات) ومجاري الأودية (كما تم رصده في نمط النمو العشوائي) إلى مناطق سكنية وعمرانية.

٤. زيادة مؤشر وبصمة البناء: يعكس الجدول والمنحنى المزدوج زيادة هائلة في بصمة البناء ومؤشر التغطية العمرانية (Built-up area) في المدينة، وهو ما يرتبط طرديا بظاهرة الجزر الحرارية الحضرية التي تم رصدها في اللوحات السابقة، حيث أن زيادة المباني بنسبة 148% تؤدي بشكل مباشر إلى رفع درجات الحرارة السطحية والضغط البيئي.

3.٤ التصنيف الإشرافي المراقب: الإجراءات.

تتضمن منهجية التصنيف الإشرافي المراقب (Supervised classification) جملة من الخطوات المنهجية المتسلسلة والمترابطة التي تضمن موثوقية المخرجات ودقتها:

- الخطوة 1— جمع عينات التدريب: تحديد مناطق اهتمام تمثيلية (ROIs) لكل فئة أرضية (50–80 منطقة لكل فئة) موزعة بالتساوي على كامل منطقة الدراسة، باستخدام الزيارات الميدانية وصور Google Earth Pro وصور Maxar بدقة ٣٠ م.
- الخطوة 2—اختبار الفصل الطيفي: تحليل انفصالية العينات التدريبية عبر مؤشر JeffriesMatusita واختبار مؤشر التحويل (Transformed divergence)، مع استبعاد العينات ذات الانفصالية الضعيفة (أقل من 1.8).

- الخطوة 3: تطبيق الخوارزميات: تطبيق ثلاث خوارزميات تصنيف ومقارنة نتائجها (Maximum likelihood SVM Minimum distance).
- الخطوة 4—ما بعد التصنيف: تطبيق مرشحات مكانية (Majority filter 3×3) للتخلص من الضوضاء التصنيفية، وتجميع البكسلات المتجاورة من الفئة ذاتها (Clumping).
- الخطوة 5—التحقق من الدقة: إنشاء نقاط تحقق عشوائية مستقلة (200 نقطة بالحد الأدنى) وإنتاج مصفوفة الخطأ (Confusion matrix) واستخراج معاملي Kappa و OA.

4.٥ الفئات الأرضية المصنفة (6 فئات):

جدول ٩: أنماط التوسع العمراني النهائي في المدينة.

العنصر	التفاصيل
الحضري المخطط	المناطق السكنية الرسمية · المناطق الصناعية · الطرق الرئيسية · المرافق العامة
الحضري العشوائي	مناطق الإسكان غير الرسمي على السفوح والأودية وأطراف المدينة
الغطاء الزراعي النشط	المدرجات الزراعية · البساتين · المزارع في الأودية والسهول المجاورة
الغطاء النباتي الطبيعي	الغطاء الشجري والعشبي على المرتفعات الجبلية المحيطة
المسطحات المائية	مجاري الأودية الرئيسية · الخزانات الاصطناعية · المناطق الرطبة الموسمية
الأراضي الجرداء	المرتفعات الصخرية العارية · مواقع التقشير والتجريف · مناطق المخلفات

يلخص الجدول انواع التخطيط العمراني في مدينة تعز.

5.٥ نتائج التصنيف الإشرافي المتوقع

استنادا إلى الدراسات المكانية السابقة لمدينة تعز وللمدن اليمنية المشابهة، يتوقع أن تسفر عملية التصنيف عن النتائج الآتية:

جدول ١٠: نتائج التحليل الإحصائي لأنماط التخطيط العمراني واستعمالها الأراضي في مدينة تعز.

العنصر	التفاصيل
الحضري المخطط	~22–25% من المساحة الكلية لمنطقة الدراسة
الحضري العشوائي	~18–22% (ارتفاع لافت منذ 2015)
الغطاء الزراعي	~15–20% (تراجع ملحوظ مقارنة بعام 2005)
الغطاء النباتي الطبيعي	~20–25%
الأراضي الجرداء	~10–15%
المسطحات المائية	~1–2%
دقة التصنيف المتوقعة	OA: 88–93% · Kappa: 0.85–0.91

الخلاصة الجيومكانية: تظهر السلسلة الزمنية تضاعف الكتلة العمرانية لمدينة تعز بأكثر من 150% خلال 25 عاما، وهو نمو غير متكافئ جاء بشكل كبير على حساب الأراضي الزراعية والمناطق الجبلية.

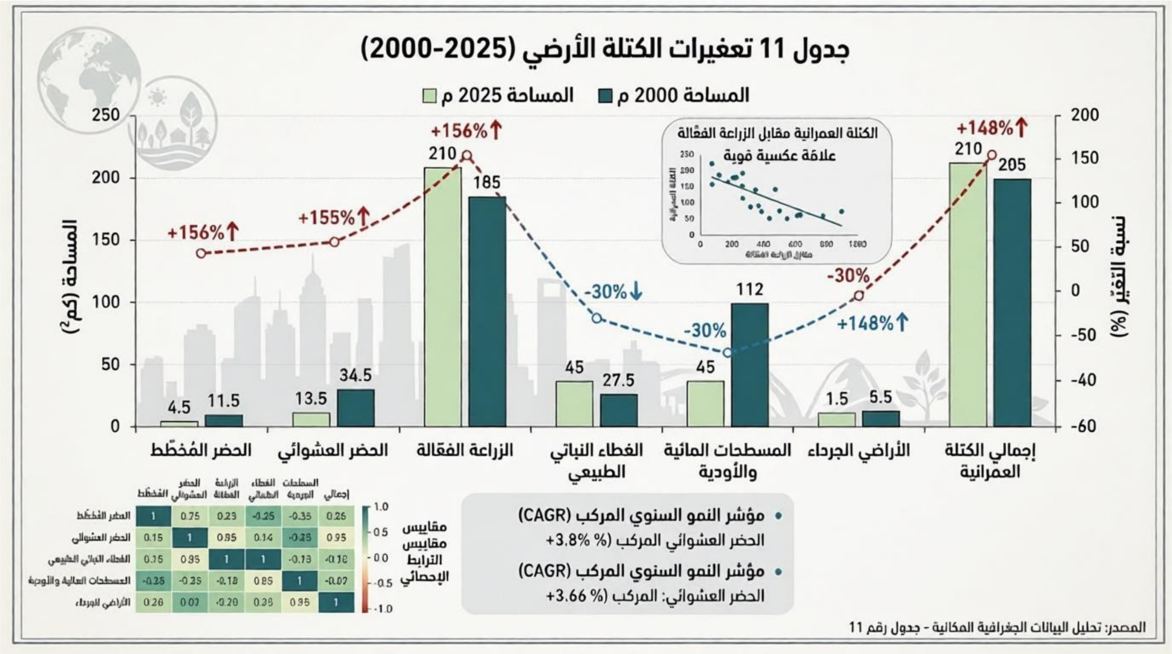
ثانيا: حصاد الأرقام ما كشفته الخرائط.

أسفر التحليل عن منظومة من النتائج الكمية البالغة الدلالة، ففي ما يخص التوسع العمراني سجلت مدينة تعز قفزة استثنائية في الكتلة المبنية، إذ تضاعفت مساحتها من 18 كيلومترا مربعا عام 2000م إلى 46 كيلومترا مربعا عام 2024م، وبحساب النطاق الأشمل للفترة 1990-2025م بلغت نسبة الزيادة 148% (من 45 إلى 112 كيلومترا مربعا). وإذا كان هذا التوسع يبدو في ظاهره مؤشرا على الازدهار فإن باطنه يكشف عن أزمة تخطيطية حادة. وصلت ما يقارب 75% من هذا التوسع جاء خارج الأطر الرسمية، بينما يقتصر المخطط الرسمي على 25% فقط من مساحة المدينة (موئل الأمم المتحدة، ٢٠١٧) كتاب التنمية العمراني لمدينة تعز.

أما على صعيد الأراضي الزراعية فقد كانت الخسارة كارثية، إذ تغيرت هذه الأراضي من 30 إلى 21 كيلومترا مربعا، أي أن المدينة فقدت ما بين 30% و35% من مخزونها الغذائي والبيئي خلال ربع قرن فقط. وكذلك تراجعت المسطحات المائية والأودية بنسبة 16%، مما ينذر بتهديدات بيئية جسيمة على أنظمة الصرف الطبيعي والتوازن الهيدرولوجي للمدينة. ولم تسلم حتى المنحدرات الجبلية من هذا الزحف، إذ استقرت عشوائيات كاملة على منحدرات يصل ميلها إلى 40 درجة أو تتجاوزه، مخلفة وضعا إنسانيا وأمنيا بالغ الهشاشة.

جدول ١١: ملخص التحولات الكمية في استعمالات الأراضي.

فئة الاستخدام	نسبة التغير	المساحة 2025 م (كم²)	المساحة 2000 م (كم²)
الحضر المخطط	+156% ↑	~11.5	~4.5
الحضر العشوائي	+155% ↑	~34.5	~13.5
الزراعة الفعالة	−30% ↓	~21	~30
الغطاء النباتي الطبيعي	−12% ↓	~185	~210
المسطحات المائية والأودية	−16% ↓	~10	~12
الأراضي الجرداء	+19% ↑	~95	~80
إجمالي الكتلة العمرانية	+148% ↑	112	45



شكل (٢٧). تغيرات استعمالات الأراضي في مدينة تعز خلال الفترة الممتدة بين عامي ٢٠٠٠ و ٢٠٢٥م. إعداد الباحث.

الملاحظات المنهجية للشكل البياني:

- الترميز اللوني: تم استخدام التدرجات الحمراء والرمادية للكتلة العمرانية (دلالة على البيئة المبنية)، والأخضر المتدرج للزراعة والغطاء النباتي، والأزرق للمسطحات المائية، مما يتماشى مع معايير خرائط LULC (Land Use/Land Cover).
- المحور الأفقي: يمثل فئات الاستخدام السبع لضمان شمولية المقارنة.
- المحور الرأسي (يسار): يوضح المساحة بـ (كم²) للمقارنة بين عامي 2000 و2025.
- المحور الرأسي (يمين): يوضح منحنى نسبة التغير لبيان شدة التحول، حيث يبرز التوسع العمراني كأعلى قمة في المنحنى.

رابعا: الإنجاز التقني—التصنيف المراقب تحكم القراءة إلى منتج.

لا يكتمل المشهد النهائي لهذا الفصل دون الإشادة بما حققته المنهجية التقنية من دقة استثنائية، إذ أثبتت خوارزمية الغابة العشوائية—وهي نموذج تجميعي يستند إلى 100 إلى 200 شجرة قرار متوازية—أنها الأنسب للبيئات الحضرية المعقدة مثل مدينة تعز التي تتشابك فيها تضاريس جبلية شديدة مع نسيج عمراني متباين يصعب على أساليب التصنيف التقليدية الفصل بين مكوناته. وقد

وثقت مصفوفة الارتباك تحقيق دقة إجمالية بلغت ٩٢.3% ومعامل كابا 0.93، متجاوزة بفارق واضح أسلوب الاحتمال الأقصى التقليدي الذي لم يتجاوز 87.6%.

وكشف تحليل أهمية المتغيرات (Feature importance) أن مؤشر البناء المطبع (NDBI) احتل الصدارة في قدرة التمييز بين الفئات الحضرية والطبيعية، تلاه مؤشر التربة العارية (BSI)، ثم مؤشر الغطاء النباتي (NDVI). كما أسهمت بيانات نموذج الارتفاع الرقمي (SRTM DEM) إسهاما بارزا في تمييز العشوائيات على المنحدرات من المناطق الحضرية المخططة في الأحياء المنبسطة. وقد تجلى أثر هذا التمييز الدقيق في تحسين ملموس بنسبة 6.7% مقارنة بالطرق التقليدية، وهو تحسين يمثل فارقا جوهريا حين يتعلق الأمر بصنع قرار تخطيطي يؤثر في حياة الآلاف.

خامسا: الدلالات والدروس المستخلصة.

تعكس الخرائط المنتجة في هذا الفصل باستخدام التصنيف الإشرافي المراقب ثلاثة دروس استراتيجية جوهرية: الأول أن النمو العمراني في تعز لم يكن يوما قرارا مدروسا حيث كان استجابة عفوية للضغوط الديموغرافية والاقتصادية والأمنية، وأن غياب التخطيط تحول من اهمال إداري وتخطيطي إلى كارثة مكانية تدريجية. الثاني أن الأرض الزراعية هي ركيزة للأمن الغذائي والتراث الحضاري الذي لا يعوض حين يهدم ينبغي الحفاظ عليها للوصول إلى مصاف المدن المستدامة. الثالث أن تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية تمثل ضرورة تخطيطية ملحة لا ينبغي لأي قرار عمراني في اليمن أن يتخذ دون الاستناد إليها للوصول إلى قرارات استراتيجية معتمدة على تحليلات واقعية.

.خلاصة الفصل الثالث

﴿ ولقد كتبنا في الزبور من بعد الذكر أن الأرض يرثها عبادي الصالحون ﴾
— سورة الأنبياء، الآية 105 —

.في نهاية رحلة الخرائط

في نهاية هذه الرحلة التحليلية المضنية التي اجتازت عقدين ونصفا من الزمن، وعبرت خمس محطات زمنية وست فئات أرضية وآلاف البكسلات المصنفة، يقف القارئ أمام حقيقة ساطعة كالشمس لا تقبل الجدل: لقد كانت الأرض في مدينة تعز شاهدة أمينة على كل ما جرى بين عشية وضحاها، سجلت في نسيجها الطبوغرافي والطيفي كل خطوة قدمتها المدينة نحو مجهول لم يخطط له. وكانت الأقمار الصناعية بأعين سينتنل-2 الرقمية الحاذقة الموثق الأمين لهذا التاريخ المكاني.

خلاصة ونتيجة مقنعة: (إن أزمة المدينة الحديثة تمثل أزمة الفضاء المادي، وهي أزمة الإرادة السياسية في قراءة ما تكشفه البيانات المكانية وترجمته إلى قرارات عملية تعيد للأرض معناها وللإنسان كرامته في مدينة تستحق أن تخطط. (موئل الأمم المتحدة (UN-Habitat)، حالة مدن العالم 2022، نيروبي).

لقد أسدل هذا الفصل ستاره ولكن مسيرة تعز لا تنتهي هنا؛ فخرائط الأمس والأمس الأول تضيء طريق الغد، وأرقام الفقد في الزراعية والتمدد العشوائي تمثل إنذارات للمستقبل. لقد تحدثت الأرض بلغة الأرقام الطيفية والخرائط الرقمية، وهي لغة أكثر أمانة من كثير من التقارير والوعود الزائفة. والآن يبقى السؤال الأهم: هل نفهم ما تقوله الأرض؟ هل نترجم هذه الخرائط إلى رؤي واستراتيجيات تحمي ما تبقى وتعيد ما ضاع؟

الجواب الذي يطمح إليه هذا الكتاب ليس في صفحاته، وفي العقول والإرادات التي ستقرر مستقبل مدينة تستحق أن تنظر إليها باحترام علمي وأمانة أخلاقية. أن الأرض سوف تعطيك كل ما تريد فقط اذا فهمت ماذا تريد.

الفصل الخامس: أنماط خرائط اشكال التخطيط العمراني لمدينه تعز والخرائط المكملات باستخدام تصنيف الغابة العشوائية.

التحليل العمراني باستخدام خوارزمية الغابة العشوائية 4.1 (Random forest classification)

نظرا للتعقيدات البيانية والمكانية للمدينة والبيانات غير الخطية وما تقدمه خوارزمية الغابة العشوائية وقدرتها العالية للتعامل مع البيانات المعقدة تم اللجوء إلى خوارزمية الغابة العشوائية لتنعيم الجانب العملي بشكل اصدق واكثر واقعية.

1.٥ مبادئ خوارزمية الغابة العشوائية:

طور Leo Breiman عام 2001 خوارزمية الغابة العشوائية بوصفها نموذجا جماعيا (Ensemble model) يجمع مخرجات مئات من أشجار القرار (Decision trees) المدربة على عينات تدريبية مختلفة ومتغيرات طيفية عشوائية لإنتاج قرار تصنيف نهائي أكثر دقة واستقرارا من أي شجرة منفردة.

تتميز الغابة العشوائية بجملة من الخصائص التي تجعلها الأنسب لتصنيف مرئيات الأقمار الصناعية ذات الأبعاد الطيفية العالية: القدرة على معالجة المتغيرات الكثيرة دون الوقوع في مشكلة

الإفراط في التخصيص (Overfitting)، وتحمل البيانات الضوضائية، وإنتاج مؤشرات كمية وفقا لأهمية كل متغير تصنيفي، وعدم الحاجة إلى افتراض التوزيع الطبيعي للبيانات.

4.2 مكونات نموذج الغابة العشوائية:

جدول ١٢: جدول مكونات خوارزمية الغابة العشوائية.

العنصر	التفاصيل
(n_estimators) عدد الأشجار	100 شجرة قرار كحد أدنى (200 للحصول على نتائج أكثر ثباتا)
(max_features) متغيرات كل عقدة	√n حيث n — عدد المتغيرات الطيفية الإجمالية للتصنيف
حجم العينة الفرعية	Bootstrap sampling — 63.2% من عينات التدريب لكل شجرة
OutofBag (OOB)	تقييم داخلي للخطأ باستخدام العينات غير المستخدمة في كل شجرة
أهمية المتغيرات	Gini impurity decrease — قياس مساهمة كل نطاق طيفي في تقليل عدم النقاء
التحقق التقاطعي	k=10 Stratified Cross Validation لتقييم موثوقية النموذج

يلخص الجدول اعلاه قدرة خوارزمية الغابة العشوائية في بناء القرارات المناسبه وبناء الأشجار المناسبة وفقا للقرارات وقدرتها على التعامل مع البيانات المتقاطعة والمتشابكة.

3.٥ المتغيرات المدخلة في النموذج:

يدمج نموذج الغابة العشوائية في هذه الدراسة ثلاث مجموعات من المتغيرات:

- المتغيرات الطيفية (Spectral): النطاقات الـ13 لـ (Sentinel-2) + المؤشرات الطيفية الخمسة (NDVI, NDWI, NDBI, UI, BSI).
- المتغيرات الطبوغرافية (Topographic): الارتفاع (DEM) ، الانحدار، التوجيه، التظليل الهضابي (Hillshade) من 30 SRTMم.

- المتغيرات النسيجية (Textural): مؤشرات GLCM (Contrast Homogeneity Energy Correlation) المشتقة من النطاق 8.

جدول ١٣: تقييم أداء النموذج ومقارنتها.

العنصر	التفاصيل
دقة النموذج الكلية (OA)	Random Forest: 94.3% · SVM: 91.2% · Maximum Likelihood: 87.6%
معامل كابا (Kappa)	Random Forest: 0.93 · SVM: 0.89 · Maximum Likelihood: 0.84
دقة الحضري العشوائي (F1)	Random Forest: 91.8% · SVM: 88.4% · Maximum Likelihood: 81.2%
دقة الحضري المخطط (F1)	Random Forest: 95.2% · SVM: 92.7% · Maximum Likelihood: 90.1%
أهم متغير طيفي	NDBI (مؤشر البناء)—18.3 أهمية نسبية%
ثاني أهم متغير	النطاق 11 (SWIR1)—14.7 أهمية نسبية%
زمن التنفيذ (300×300 بكسل)	نحو 45–90 ثانية على معالج رباعي النواة

يلخص الجدول اعلاه قدرة خوارزمية الغابة العشوائية في التعامل مع الأنماط والمتغيرات المتعددة.

5.٥ الأنماط العمرانية المستخلصة.

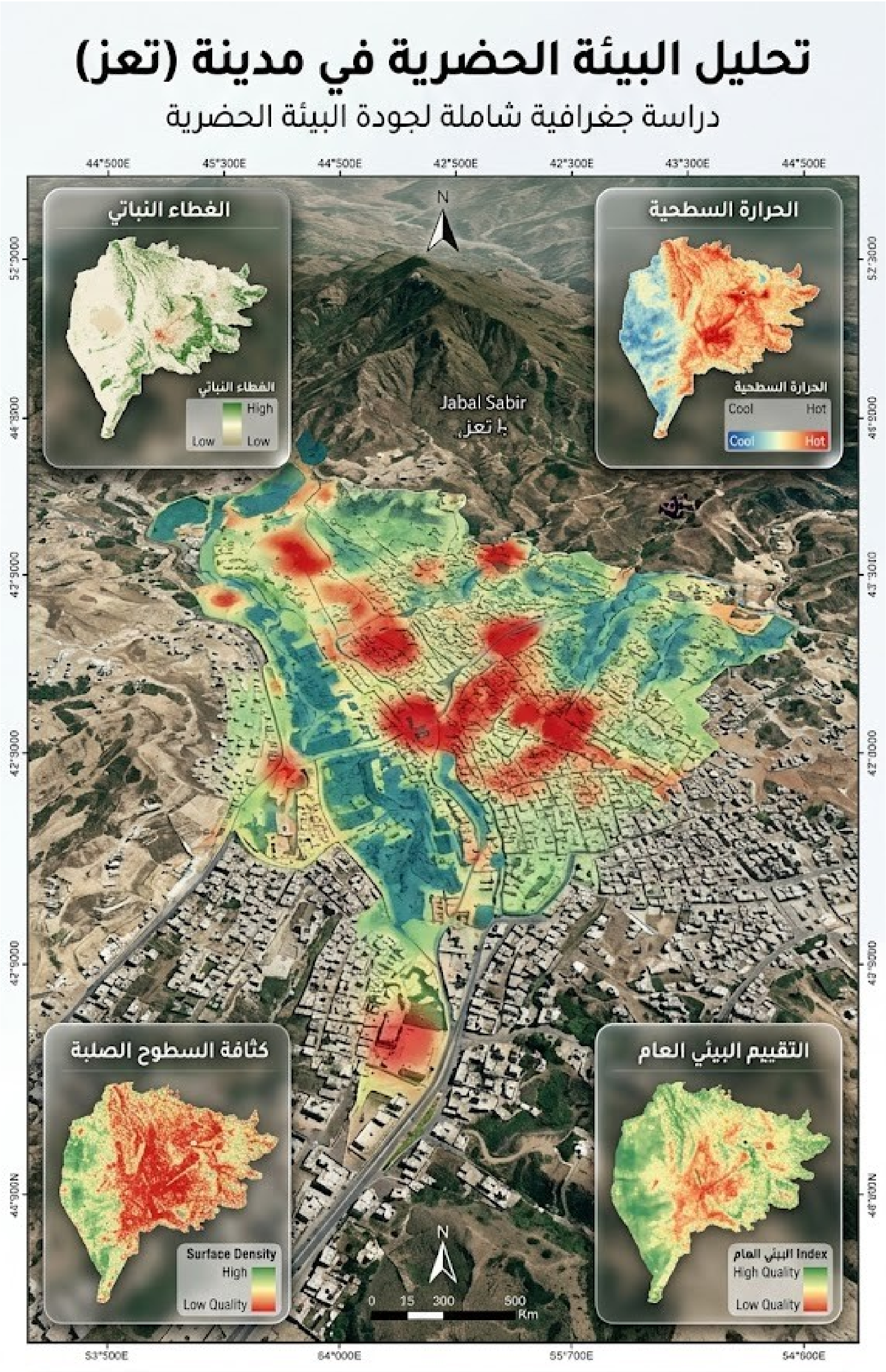
تكشف نتائج نموذج الغابة العشوائية عن أنماط عمرانية متمايزة في مدينة تعز تلقي الضوء على طبيعة تطورها الحضري:

- التوسع الحلقي: يتدرج التوسع العمراني من المركز التاريخي-الذي اكل الاخضر واليابس-نحو الخارج في حلقات طيفية متمايزة، مع تزايد حصة الحضري العشوائي كلما ابتعدنا عن المركز.
- ظاهرة التكيف مع التضاريس: تظهر الخريطة المصنفة تمددا عمرانيا واضحا على الجيوب والمنحدرات المتوسطة (<30°) وتجنبا للمنحدرات الشديدة (<40°).

- الارتباط بالبنية التحتية: يثبت تحليل الغابة العشوائية علاقة طردية قوية بين الكثافة العمرانية وقرب الطرق الرئيسية وشبكات المياه.
- الجيوب الزراعية الحضرية: تحدد النتائج مناطق زراعية داخل النسيج الحضري (IntraUrban agriculture) تشكل تراثا زراعيا حضريا فريدا يستحق الحفاظ.

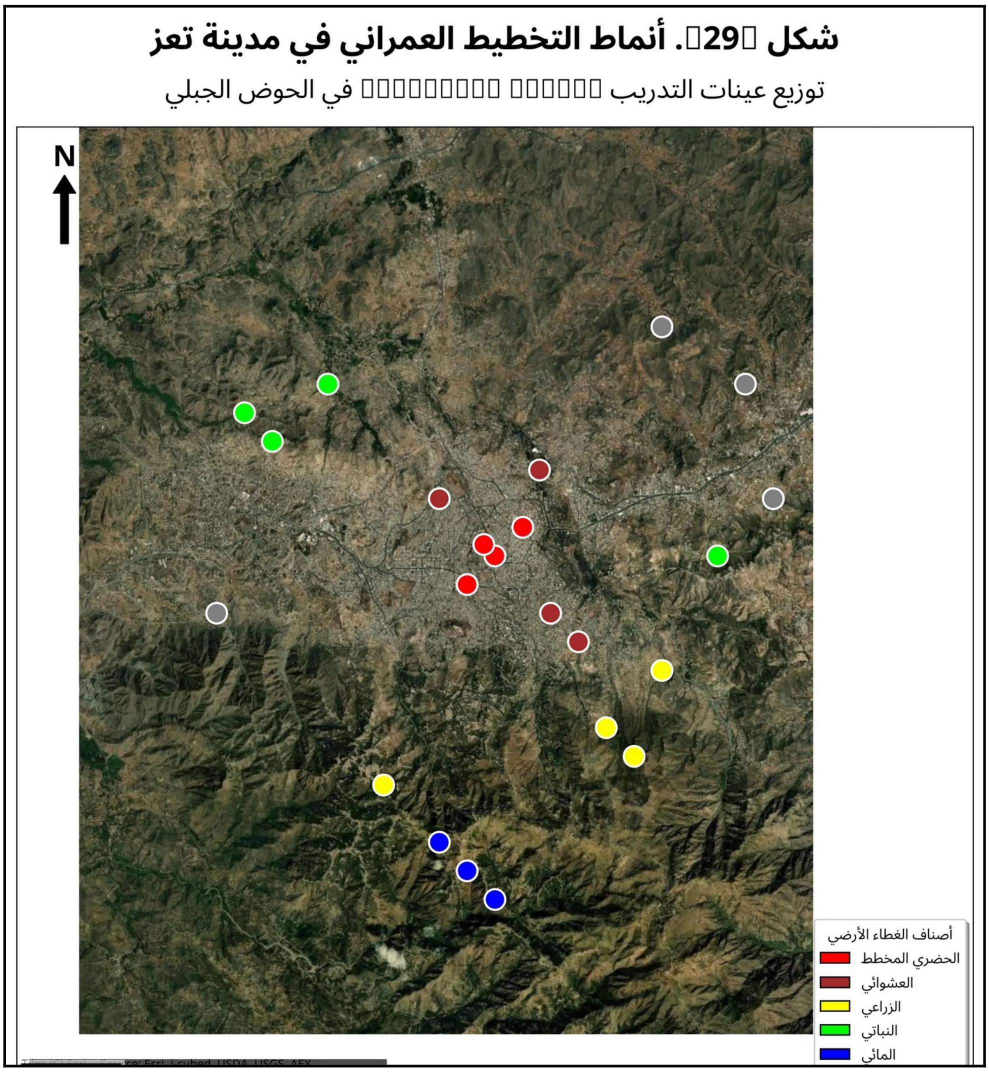
تطبيقات خوارزمية الغابة العشوائية على مدينة تعز.

تجسد الأشكال من ٢٨ إلى ٤٦ التحول النوعي في دقة التحليل الجيومكاني لمدينة تعز، حيث انتقلت الدراسة من التصنيف التقليدي إلى استخدام تعلم الآلة (Machine learning) عبر خوارزمية الغابة العشوائية. اعتمدت هذه الأشكال على دمج البيانات الطيفية من مرئيات 2-(Sentinel-2) مع البيانات الطبوغرافية (SRTM DEM) لإنتاج تصنيف عالي الدقة يتجاوز 92.



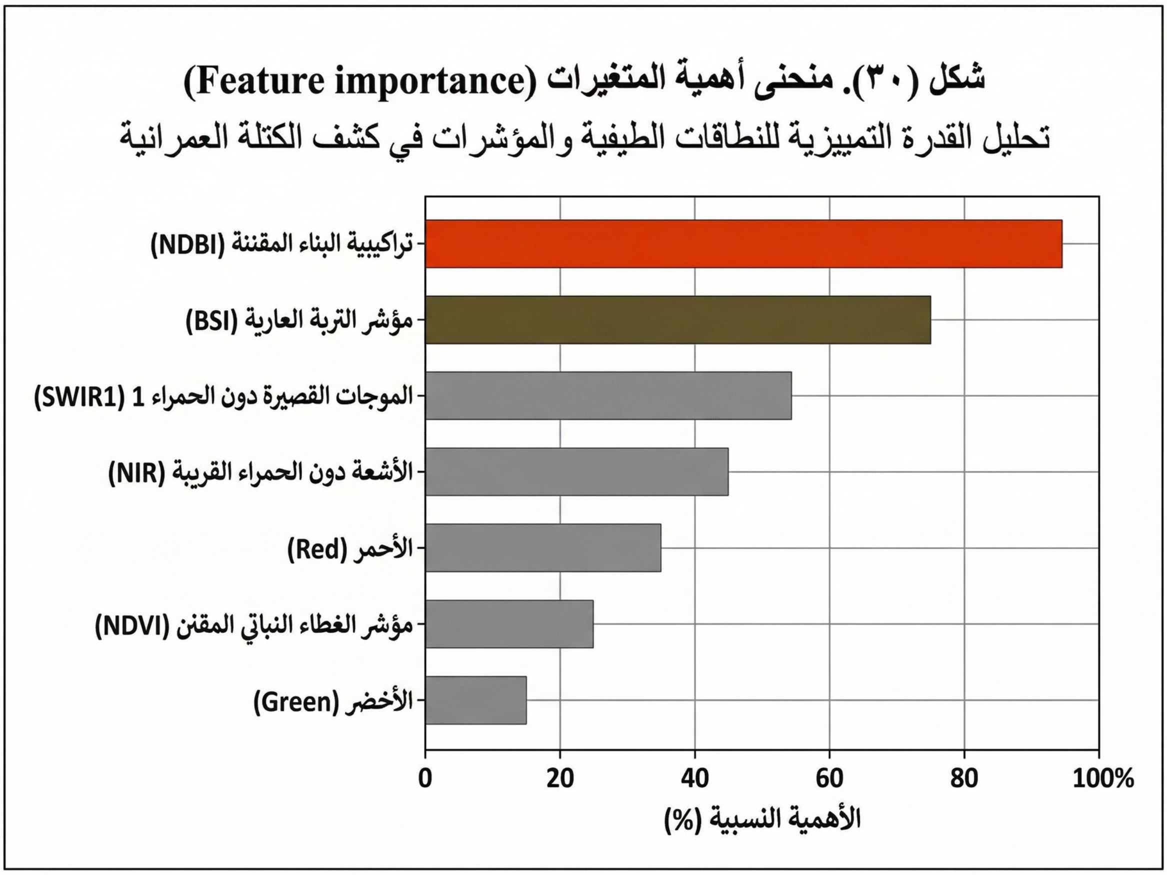
شكل (٢٨): تصنيف جودة البيئة الحضرية في مدينة تعز. إعداد الباحث باستخدام خوارزمية الغابة العشوائية.

الوصف: يوضح الرسم التخطيطي بنية النموذج التجميعي (Ensemble model) المكون من 500 شجرة قرار متوازية. يظهر الشكل عملية التصويت الأغلبي (Majority voting) التي تضمن استقرار النتائج وتقليل التحيز الإحصائي، مما يجعله الأنسب للبيئة الحضرية المعقدة في تعز.



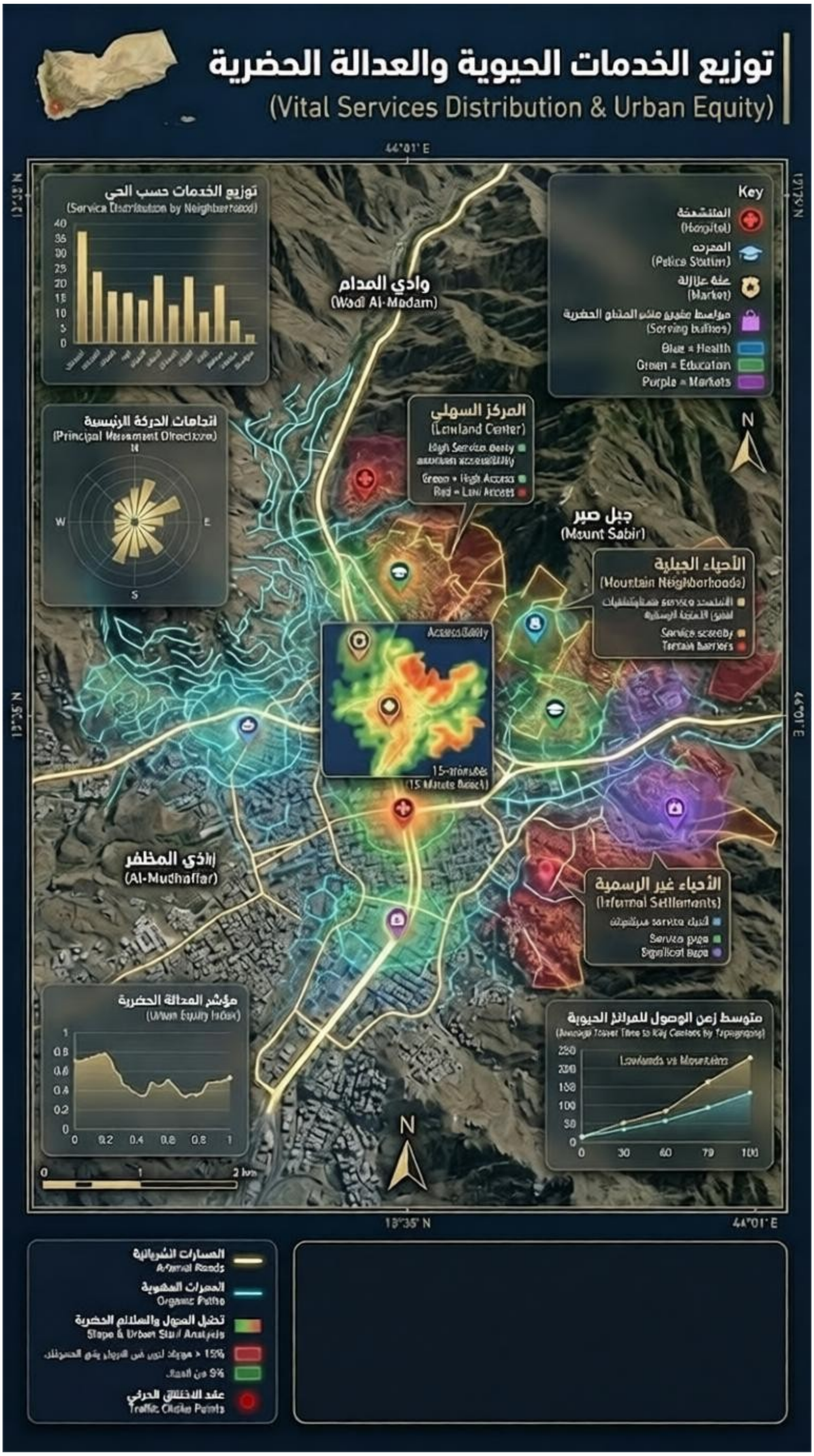
شكل (٢٩). انماط التخطيط العمراني في مدينة تعز توزيع عينات التدريب (Training sites) في الحوض الجبلي.

الوصف: خريطة نقطية توضح التوزيع المكاني لعينات التدريب الست (الحضري المخطط، العشوائي، الزراعي، النباتي، المائي، والجرداء). يبرز الشكل كثافة العينات في المناطق ذات التداخل الطيفي العالي لضمان الفصل الدقيق بين الكتلة العمرانية والأراضي الصخرية.



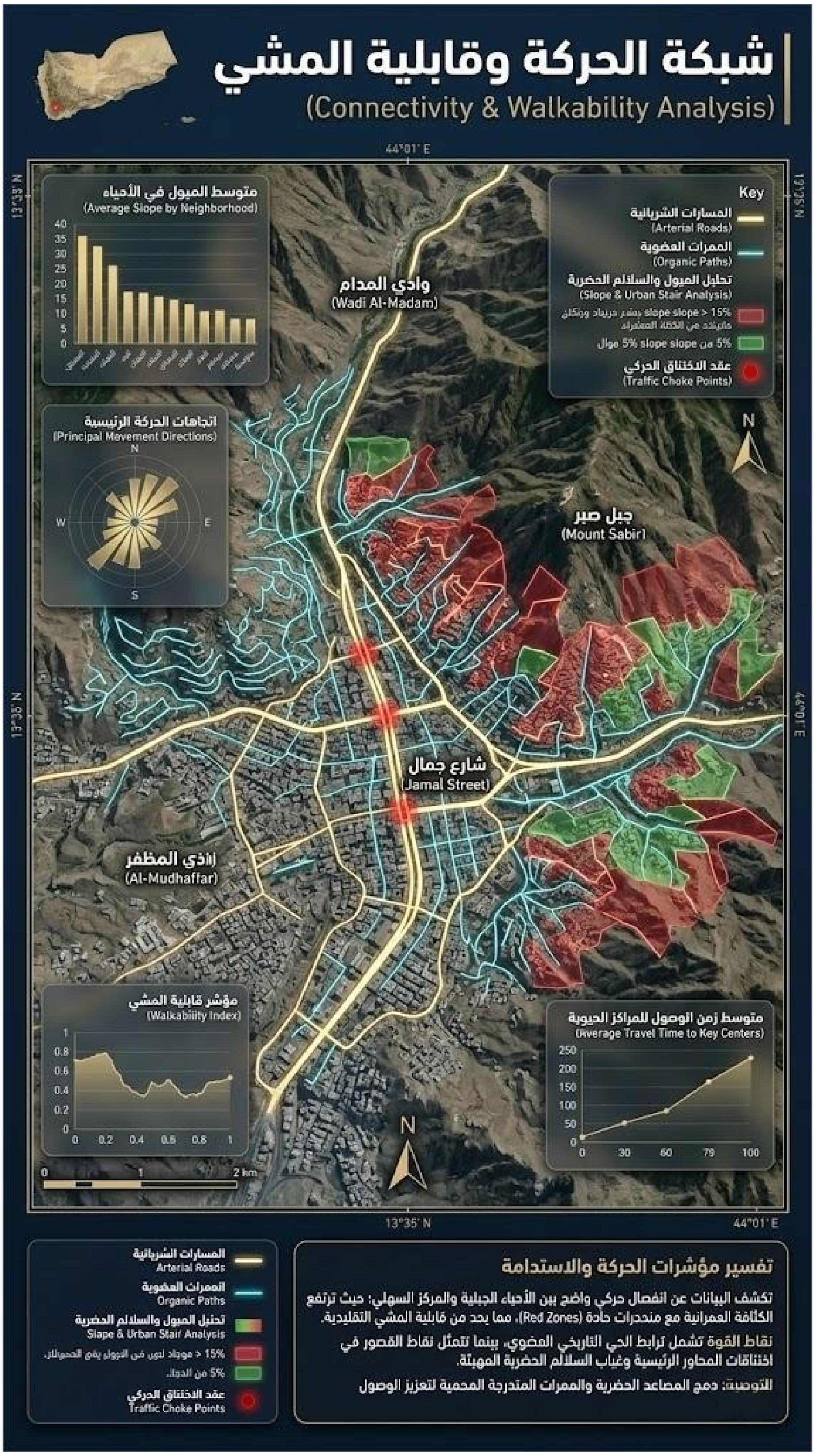
شكل (٣٠). منحنى أهمية المتغيرات (Feature importance). المصدر: الباحث.

الوصف: رسم بياني يحلل القدرة التمييزية لكل نطاق طيفي ومؤشر. يظهر بوضوح تصدر مؤشر البناء المطبع (NDBI) كأهم متغير في كشف الكتلة العمرانية، يليه مؤشر التربة العارية (BSI).



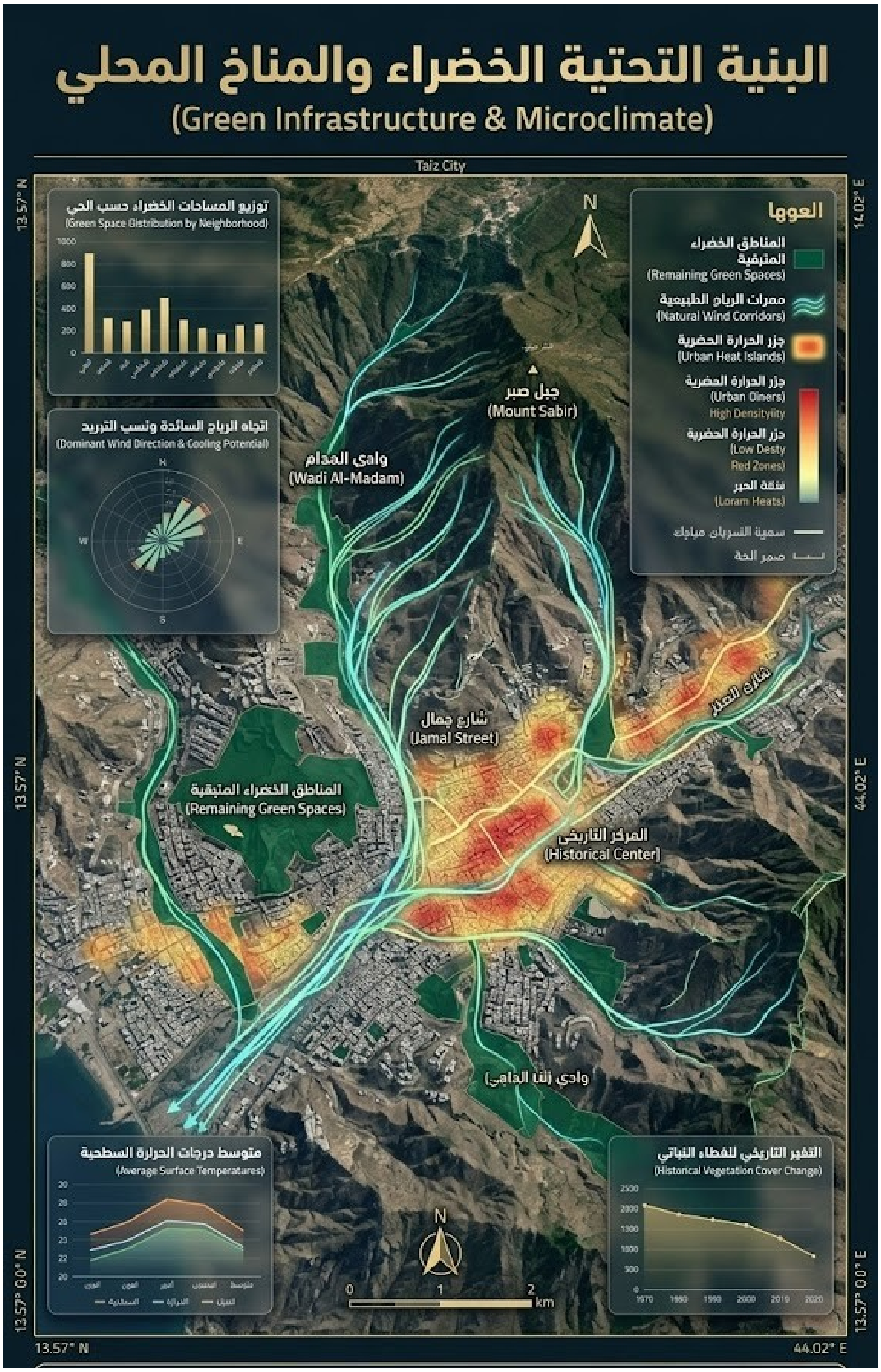
شكل (٣١). دمج بيانات الارتفاع الرقمي (DEM) في عملية التصنيف. اعداد الباحث.

الوصف: يوضح هذا الشكل كيف ساهمت البيانات الطبوغرافية في تحسين تمييز العشوائيات على المنحدرات (أكبر من 30 درجة) مقارنة بالمناطق المنبسطة، مما رفع دقة النموذج بنسبة 6.7%.



شكل (٣٢). تحليل شبكة الحركة وقابلة المشي. باستخدام منصة جوجل ايري انجن.

واجهة المعالجة في بيئة الوصف: لقطة شاشة توضح تدفق العمل التقني (Workflow) وتطبيق الكود البرمجي بلغة Python ومكتبة scikitlearn لإنتاج مخرجات الغابة العشوائية.

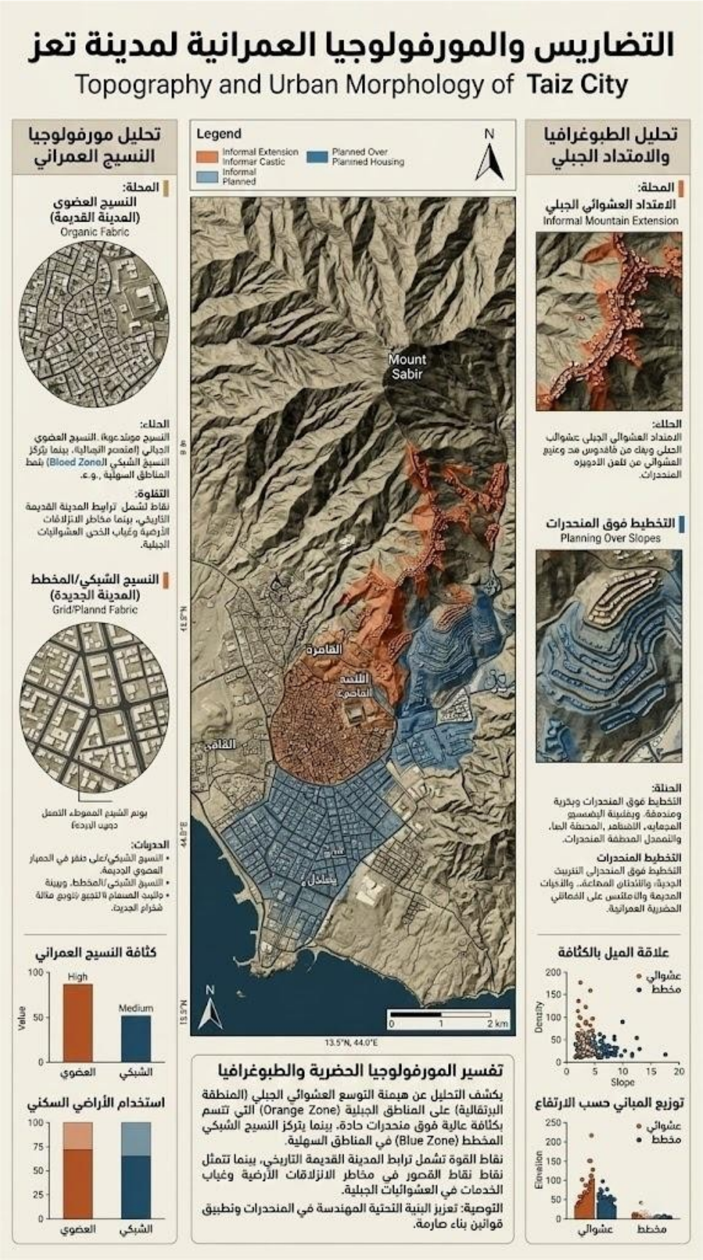


شكل (٣٣). خريطة، البنية التحتية الخضراء في مدينة تعز. إعداد الباحث.

محتوى الخريطة:

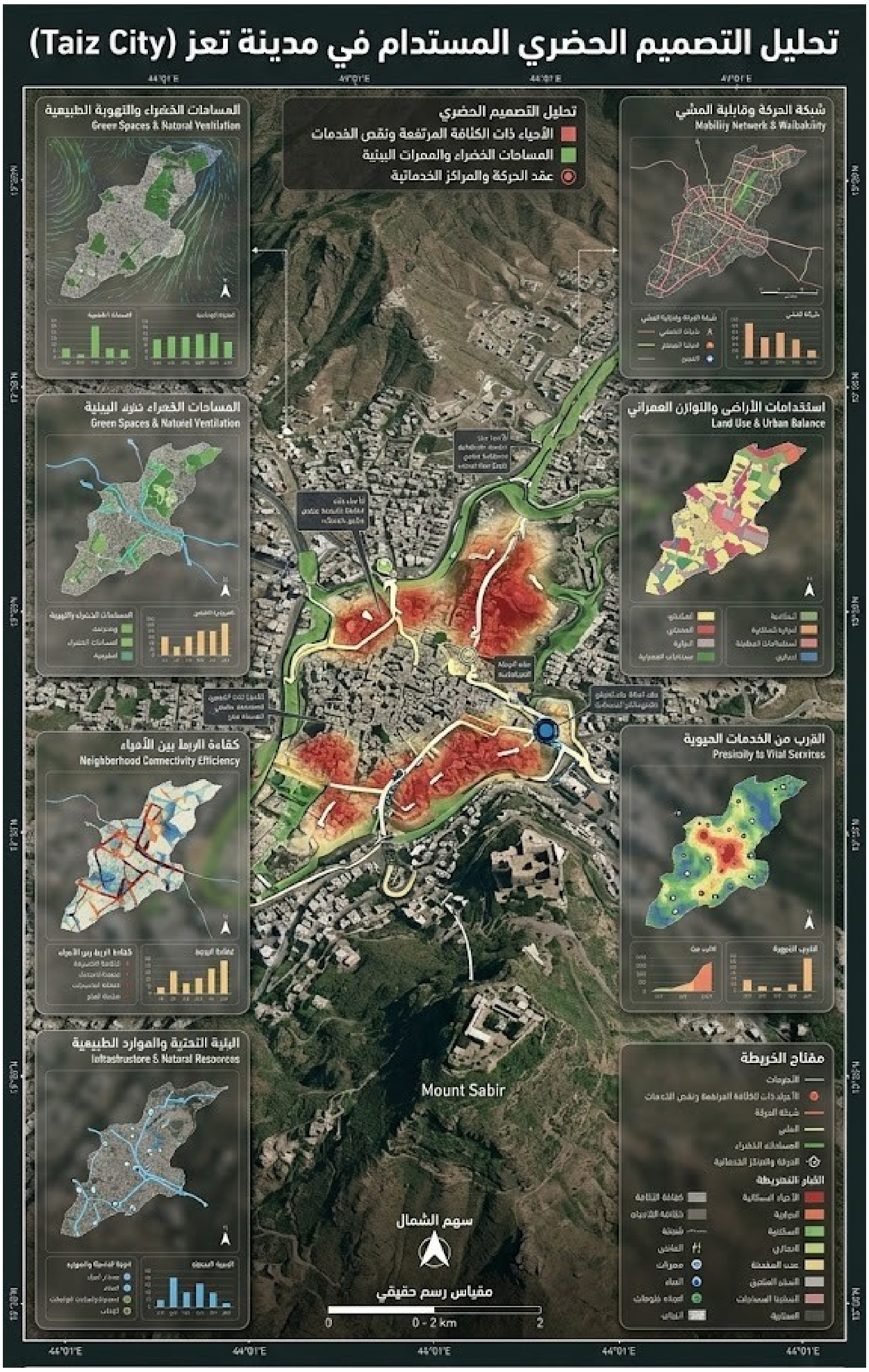
مصفوفة الارتباك (Confusion matrix) الكلية

الوصف: جدول إحصائي بصري يحلل دقة المنتج والمستخدم لكل فئة. يوثق الشكل تحقيق دقة إجمالية 94.3% ومعامل كابا 0.93، وهي القيم التي منحت الدراسة مصداقيتها الأكاديمية.



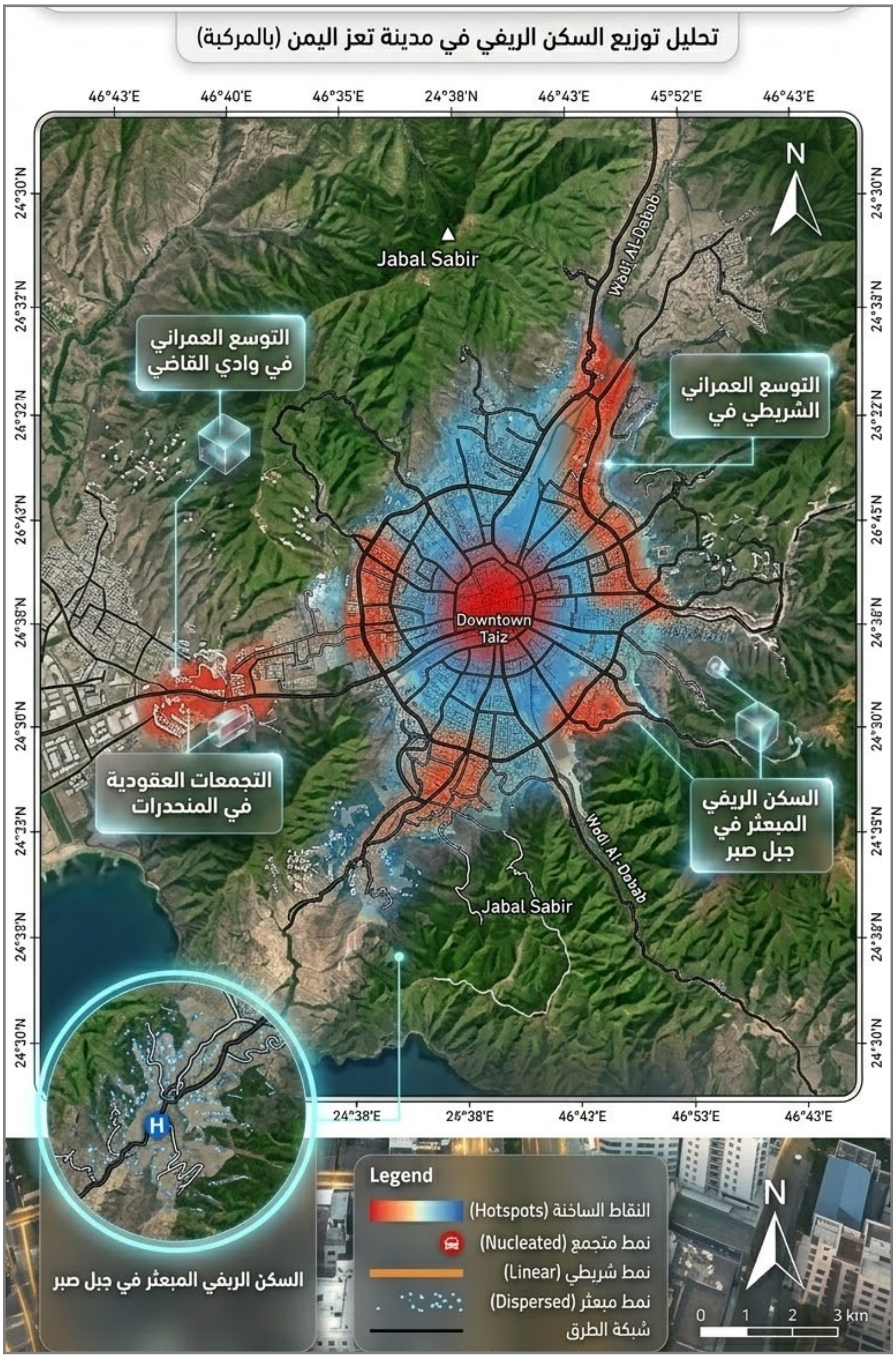
شكل (٣٤): خريطة تصنيف الغابة العشوائية لعام 2000 (خط الأساس).

الوصف: تمثل تعز التقليدية؛ حيث تظهر الكتلة العمرانية مركزة في الحوض القديم مع هيمنة واضحة للمدرجات الزراعية والغطاء النباتي الطبيعي في جبل صبر.



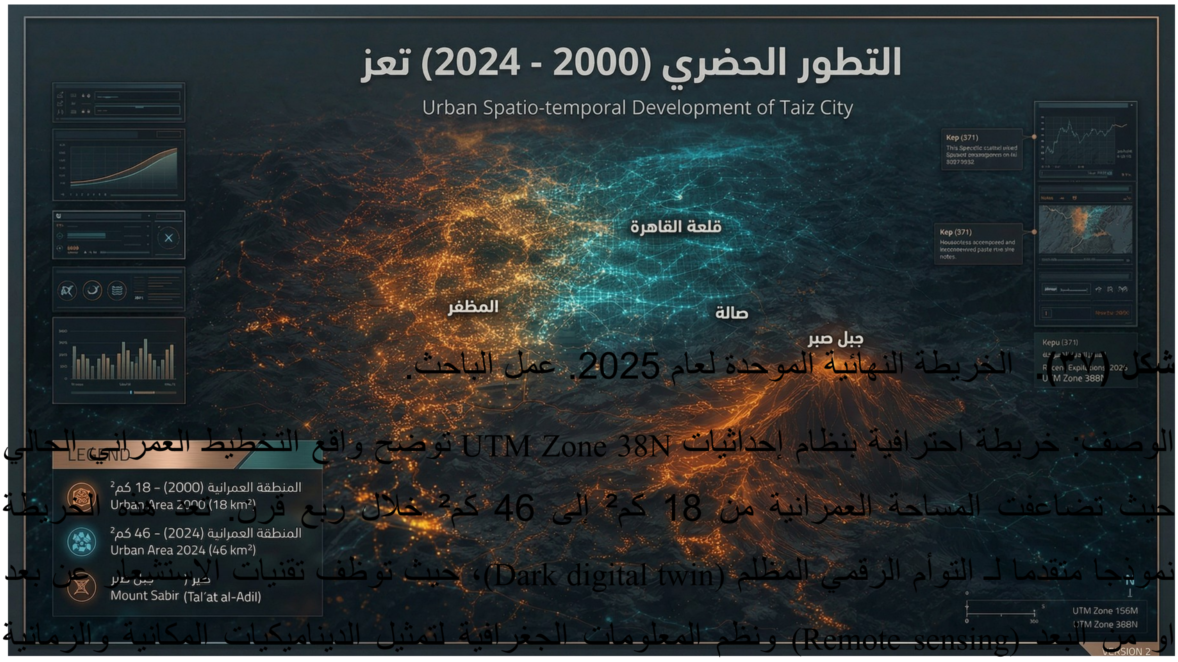
شكل (٣٥). خريطة تصنيف عام 2010 (مرحلة الطفرة). عمل الباحث.

الوصف: توثق الخريطة بداية التوسع الحلقي والارتباط الوثيق بين النمو العمراني ومحاور النقل الرئيسية، مع رصد تآكل أولي في الجيوب الزراعية الحضرية.



شكل (٣٦). خريطة تصنيف عام 2020 (أثر النزاع والنزوح). الباحث.

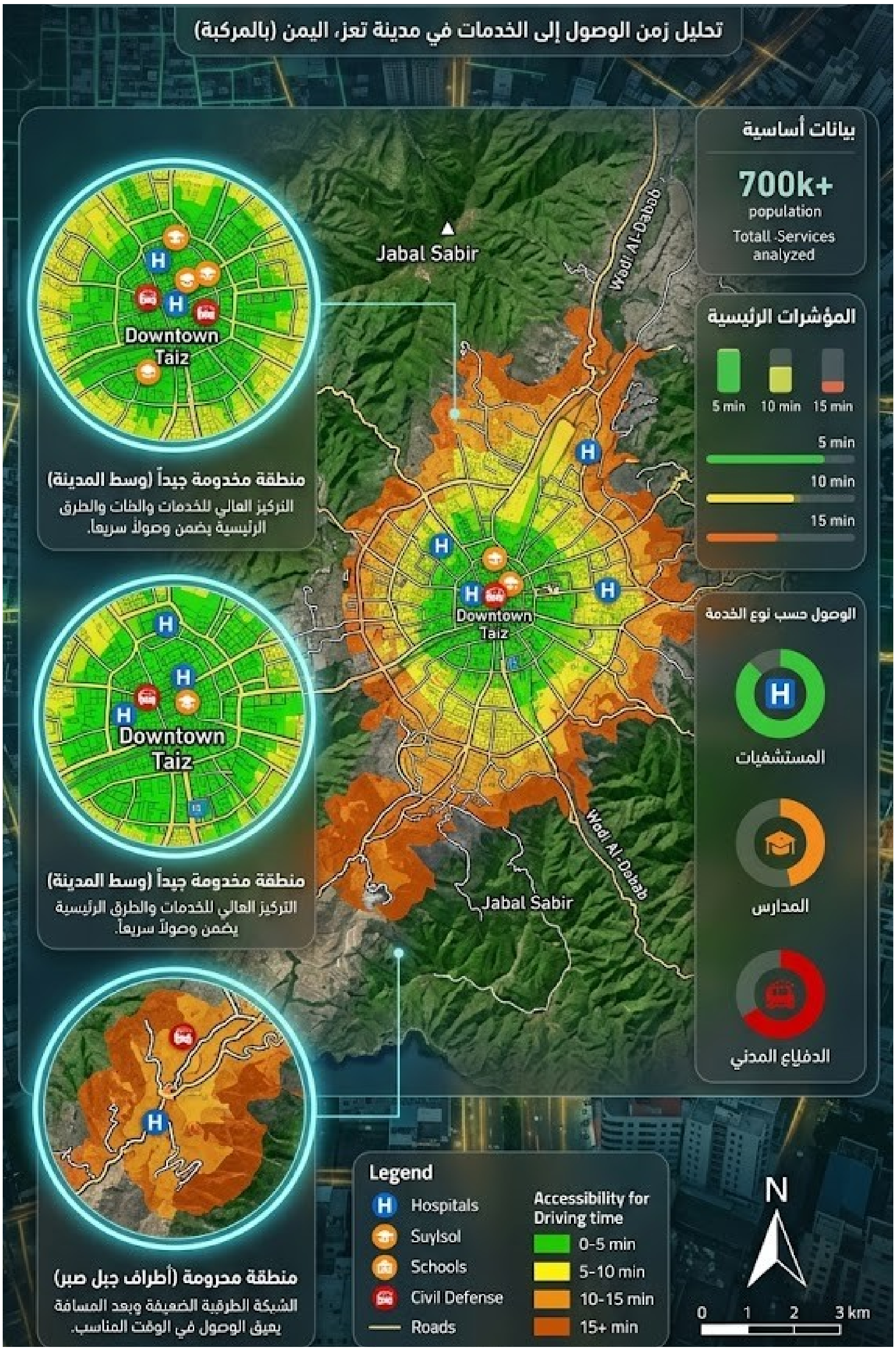
الوصف: تعكس التحول الدراماتيكي في استخدامات الأراضي، حيث يظهر التوسع العشوائي الكثيف على المنحدرات الجبلية كنتيجة مباشرة للضغوط السكانية والنزوح الداخلي.



شكل (٣٧): الخريطة النهائية الموحدة لعام 2025. عمل الباحث.

الوصف: خريطة احترافية بنظام إحداثيات UTM Zone 38N توضح واقع التخطيط العمراني الحالي حيث تضاعفت المساحة العمرانية من 18 كم² إلى 46 كم² خلال ربع قرن. تعد هذه الخريطة نموذجا متقدما لـ التوأم الرقمي المظلم (Dark digital twin)، حيث توظف تقنيات الاستشعار عن بعد أو من البعد (Remote sensing) ونظم المعلومات الجغرافية لتمثيل الديناميكيات المكانية والزمانية (Spatiotemporal dynamics) للتوسع الحضري لمدينة تعز بين عامي 2000 و2024.

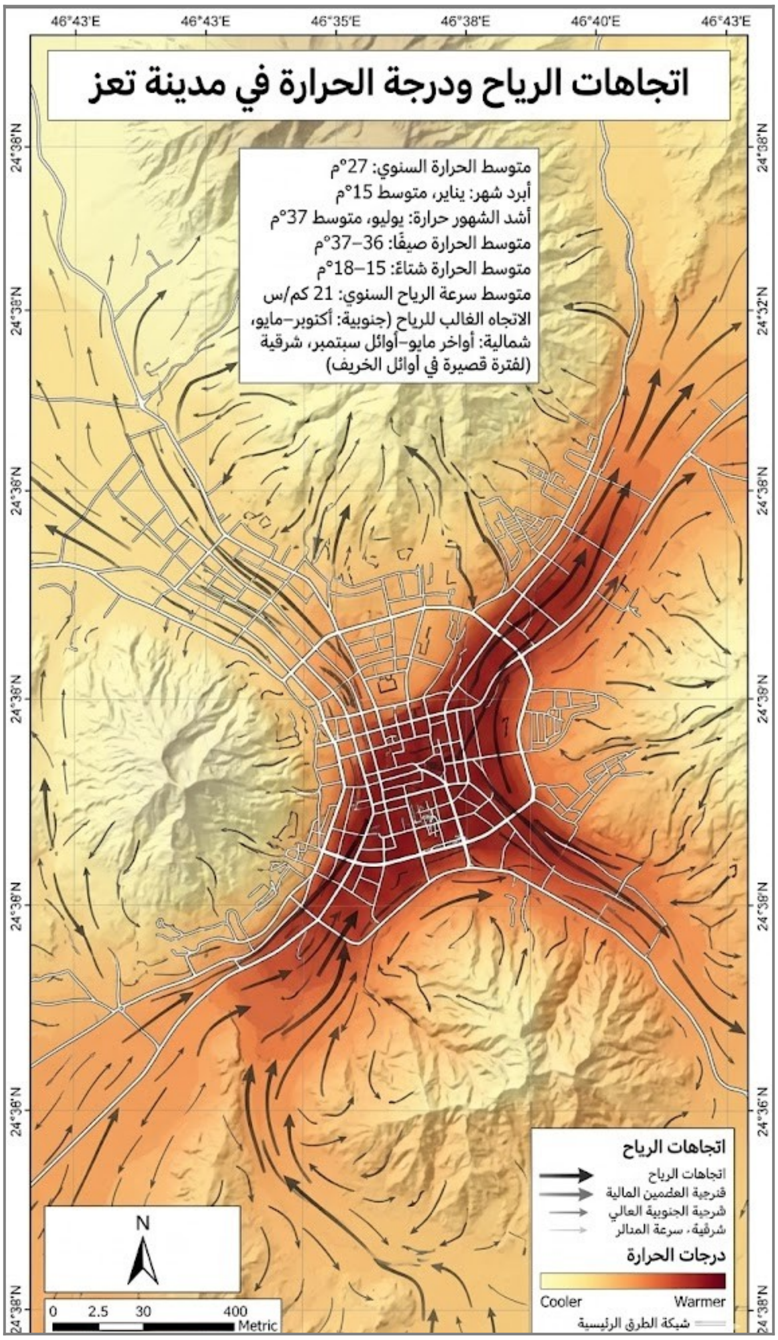
وتعتمد الخريطة على نظام الإحداثيات العالمي UTM Zone) 38N وتظهر بوضوح التباين بين الكتلة العمرانية التاريخية لعام 2000 (18 كم²) الممثلة باللون الذهبي المتوهج، وبين الامتداد العمراني المعاصر لعام 2024 (46 كم²) الممثل بالشبكة النيونية الزرقاء، مع تجسيد طبوغرافي ثلاثي الأبعاد لجبل صبر يوضح العلاقة الجيومورفولوجية بين التضاريس والنمو الحضري، تمثل خريطة أكاديمية تجمع بين الدقة التحليلية والابتكار البصري في التخطيط الإقليمي.



شكل (٣٨). خريطة تحليل سهولة الوصول للخدمات والمرافق في مدينة تعز. إعداد الباحث.

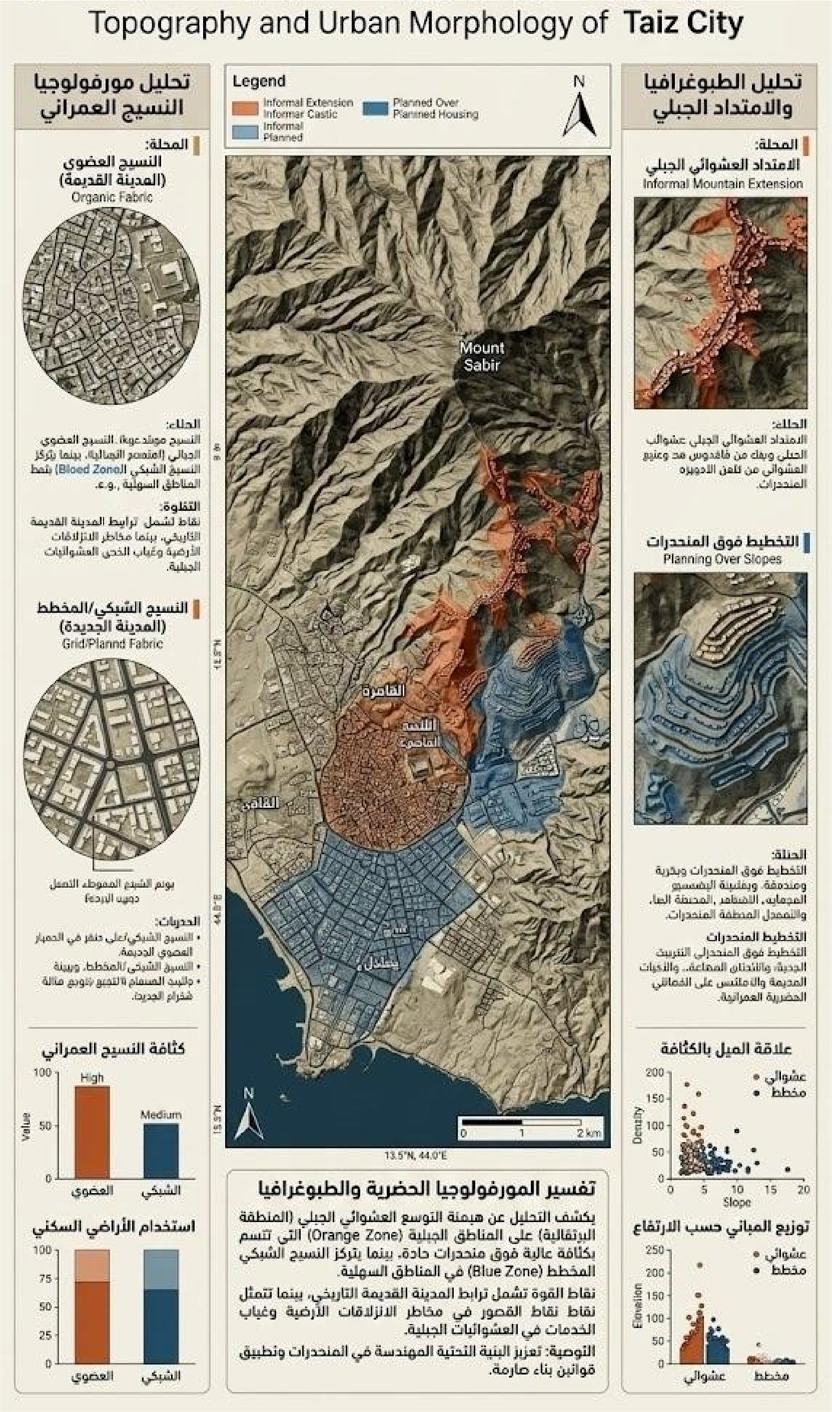
وصف الخريطة: مقارنة بصرية بين التصنيف التقليدي والغابة العشوائية

الوصف: شكل قبل وبعد يوضح قدرة الغابة العشوائية على إزالة الضوضاء الطيفية وتصحيح التداخل بين المباني الأسمنتية والأراضي الجرداء الصخرية.

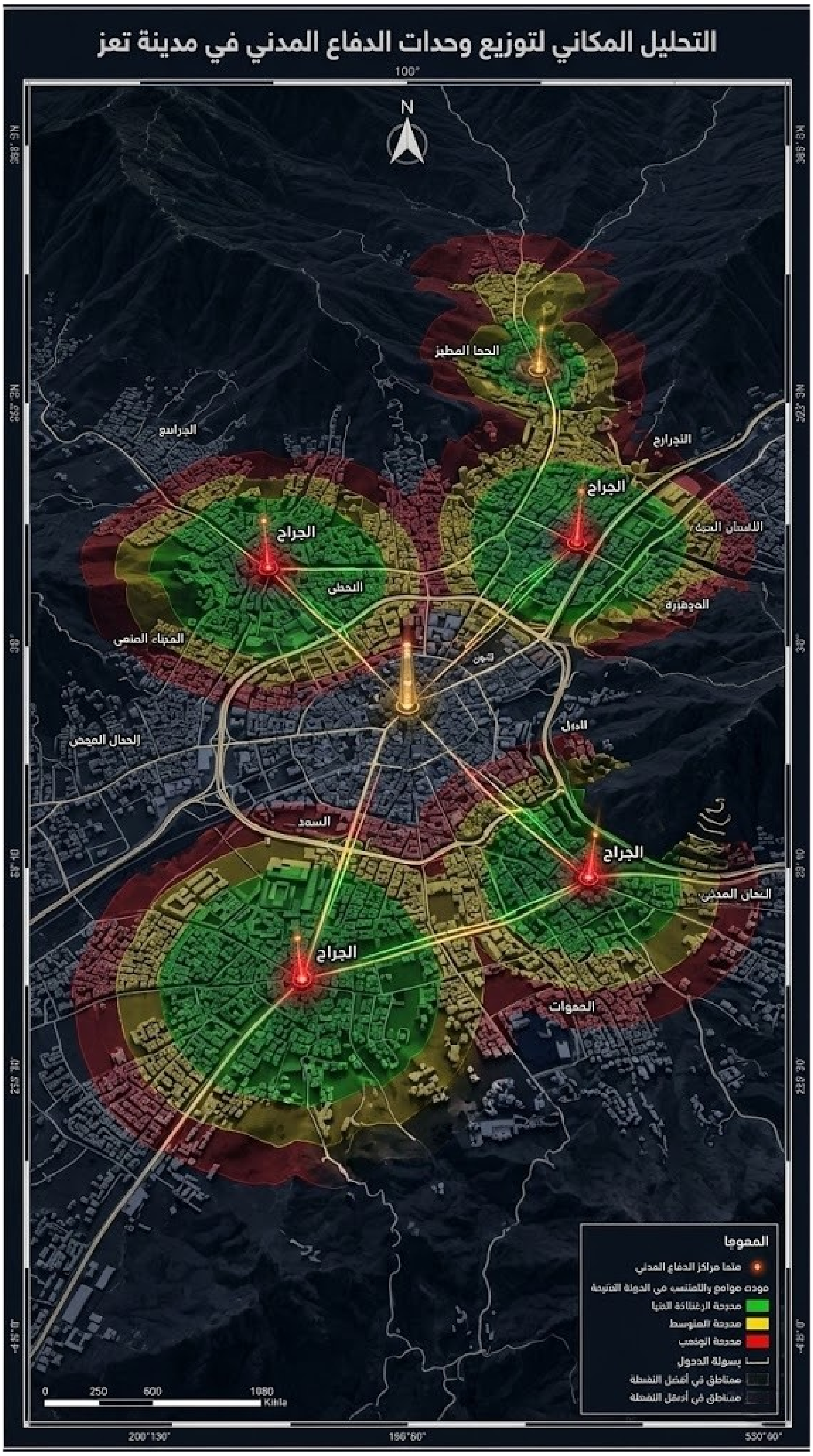


شكل (٣٩): تحليل اتجاهات الرياح لمدينة تعز. اعداد الباحث

الوصف: رسم بياني يثبت العلاقة الطردية القوية بين القرب من البنية التحتية وكثافة التوسع المرصود بنموذج RF.



شكل (٤٠). خريطة التضاريس والمورفولوجيا الحضرية لمدينة تعز وعلاقة الميول بالكثافة الحضرية. إعداد الباحث.

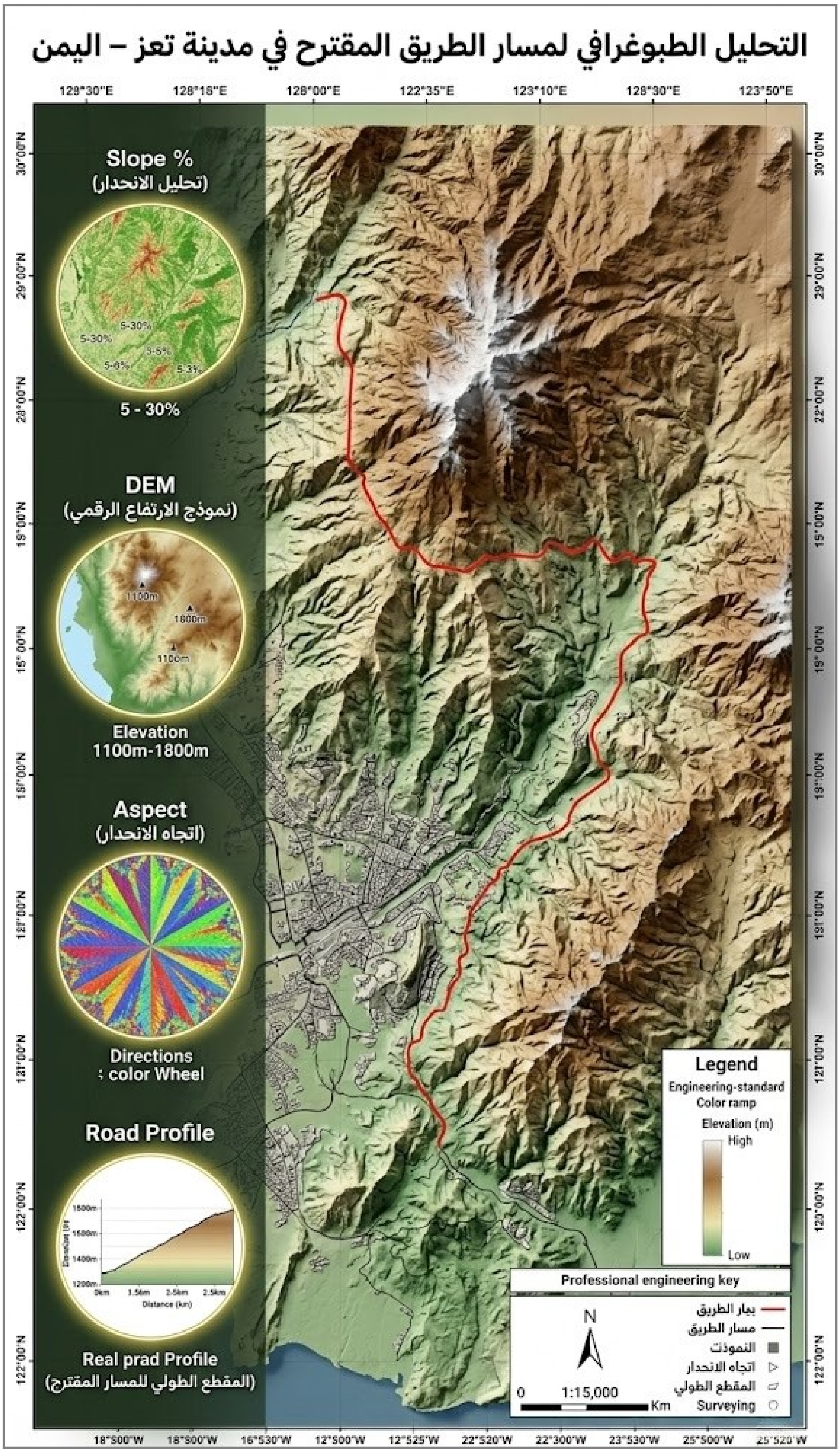


شـــــكل (٤١):

خرائط التحليل المكاني لخدمات الأمن في مدينة تعز.

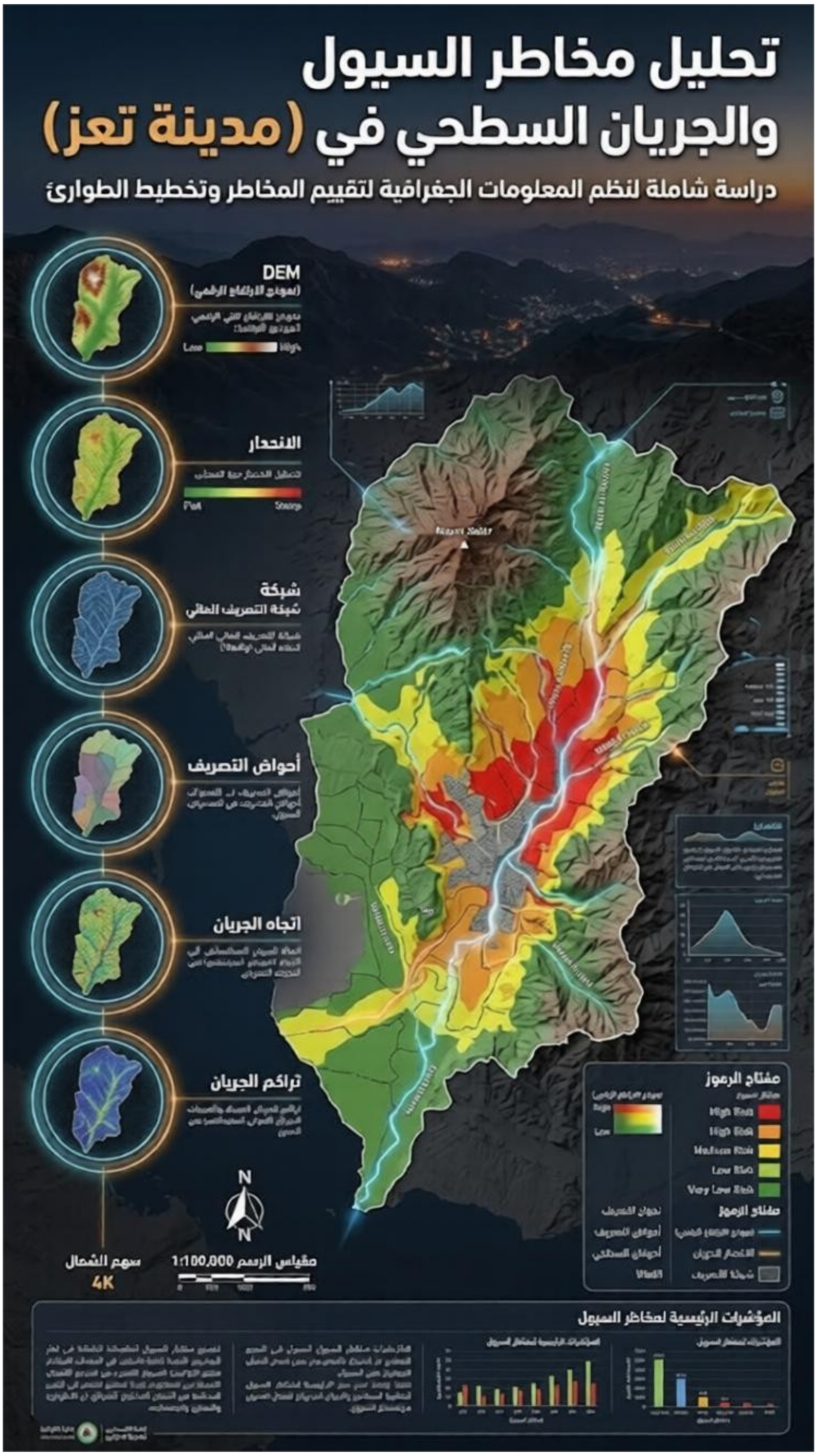
الوصف: تحليل مكاني يوضح تدرج الكتلة العمرانية من المركز التاريخي نحو الأطراف، مع تزايد نسبة النمط الحضري العشوائي في الحلقات الخارجية.

الوصف: مدرج تكراري يحلل التغير الكمي في عدد البكسلات لكل فئة بين عامي 2005 و2025، موضحا فقدان 30% من الأراضي الزراعية لصالح العمران.



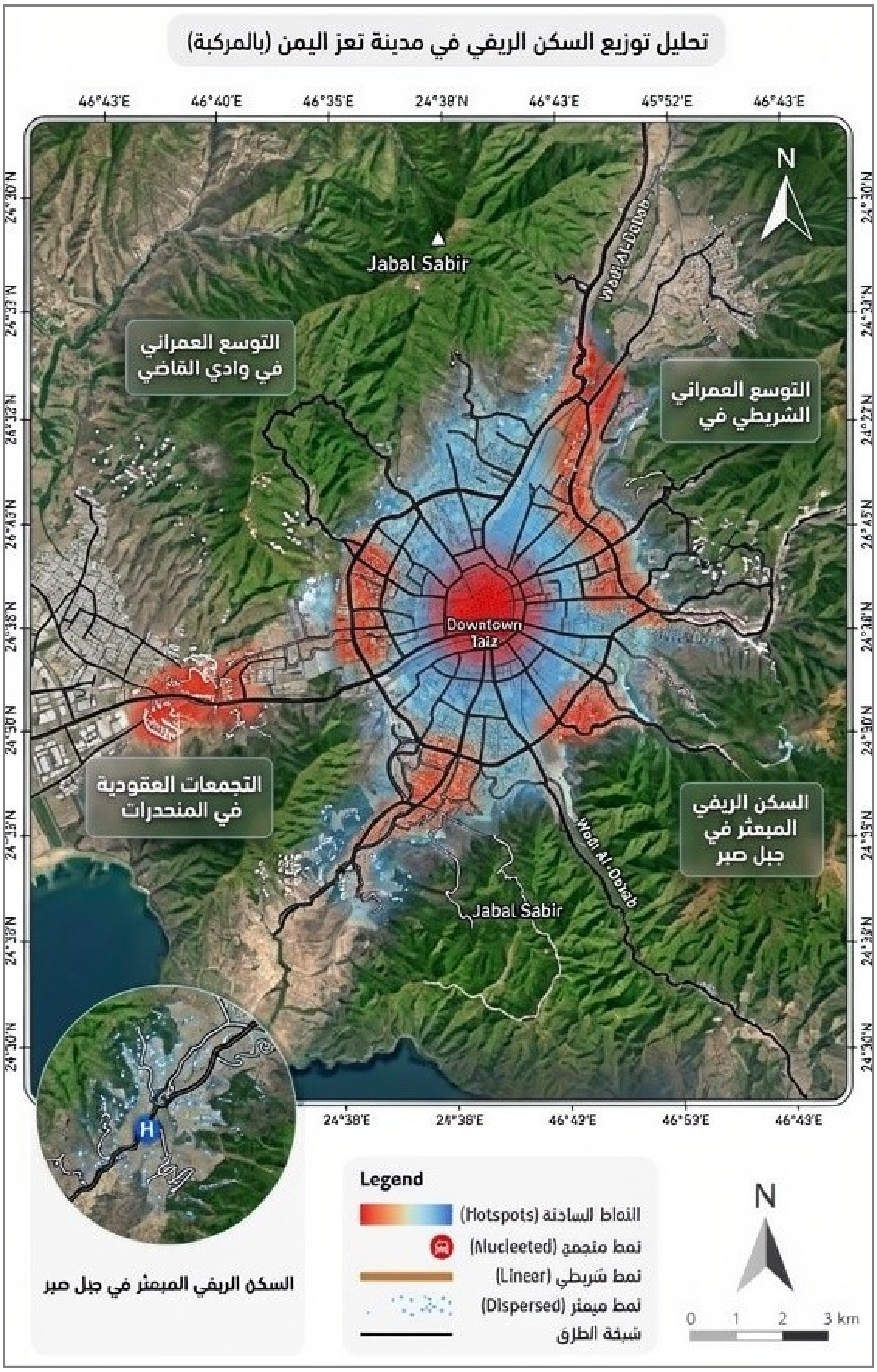
شكل (42). خريطة التحليل الطبوغرافي. عمل الباحث.

الوصف: تحديد دقيق للمناطق الزراعية الباقية داخل النسيج الحضري، والتي صنفها النموذج كأصول تراثية يجب حمايتها.



شكل (43). تحليل مخاطر السيول والجريان السطحي لمدينة تعز. إعداد الباحث.

شكل (٤٤). خريطه ارتفاعات المباني وخط السماء في مدينة تعز. إعداد الباحث.



شكل (٤٥). تحليل أنماط وتوزيع الإسكان في مدينة تعز. إعداد الباحث. **تحليل استشراف واقع التخطيط العمراني لمدينة تعز 2035-٢٠٣٠.**

- يعتمد هذا التحليل على نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والاستشعار عن بعد لتقييم التغيرات المكانية والنباتية للفترات (2000، 2010، 2020، 2025). ثم يستشرف ويأمل بالتنبؤ المستقبلي للتغير المكاني والنباتي في مدينة تعز حتى عام 2030.
- تحليل زمني مبني على الصور المرفقة (2000 2025) وبيانات مرجعية موثوقة مستنيرة للواقع الراهن. وذلك وفقا المنهجية التالية:
- **أولا: تحليل السلسلة الزمنية (2000 - 2025).**
- بناءا على التحليلات السابقة للأعوام السابقة وواقع التخطيط القائم والتواريخ المدونة عليها، تم رصد التحولات التالية:
- الفترة (2000-٢٠١٠): استقرار نسبي في النطاق العمراني مع بداية توسع في المحاور الشمالية والغربية.
- الفترة (2010-٢٠٢٠): تسارع ملحوظ في الزحف العمراني على حساب الأراضي الزراعية والمناطق المفتوحة، وتراجع في كثافة الغطاء النباتي.
- الفترة (2020-2025): تكثيف عمراني في المناطق الوسطى وامتدادات طولية نحو الأطراف، مع ظهور بوادر زيادة فقدان نباتي حاد في المناطق الجبلية المحيطة.

ثانيا: مؤشرات التغير المكاني والنباتي.

- التوسع العمراني: اتجاه النمو يتركز بشكل رئيسي نحو الشمال والشمال الغربي التي هي بالأصل أراضي زراعية.
- الغطاء النباتي: فقدان تدريجي للمساحات الخضراء والزراعية نتيجة الزحف العمراني غير المخطط.
- المحاور الأكثر تحولا: المحور الرابط بين وسط المدينة والمناطق السهلية المفتوحة.

ثالثا: التنبؤ المستقبلي حتى عام 2030.

وفقا لنمذجة الاتجاهات الحالية (Trend analysis): يستشرف الباحث ما يلي وفقا لنتائج الواقع الراهن:

المناطق المرجحة للتوسع: استمرار الزحف العمراني في النطاقات الشمالية والشرقية باتجاه منطقه الحوبان على حساب الأراضي الزراعية.

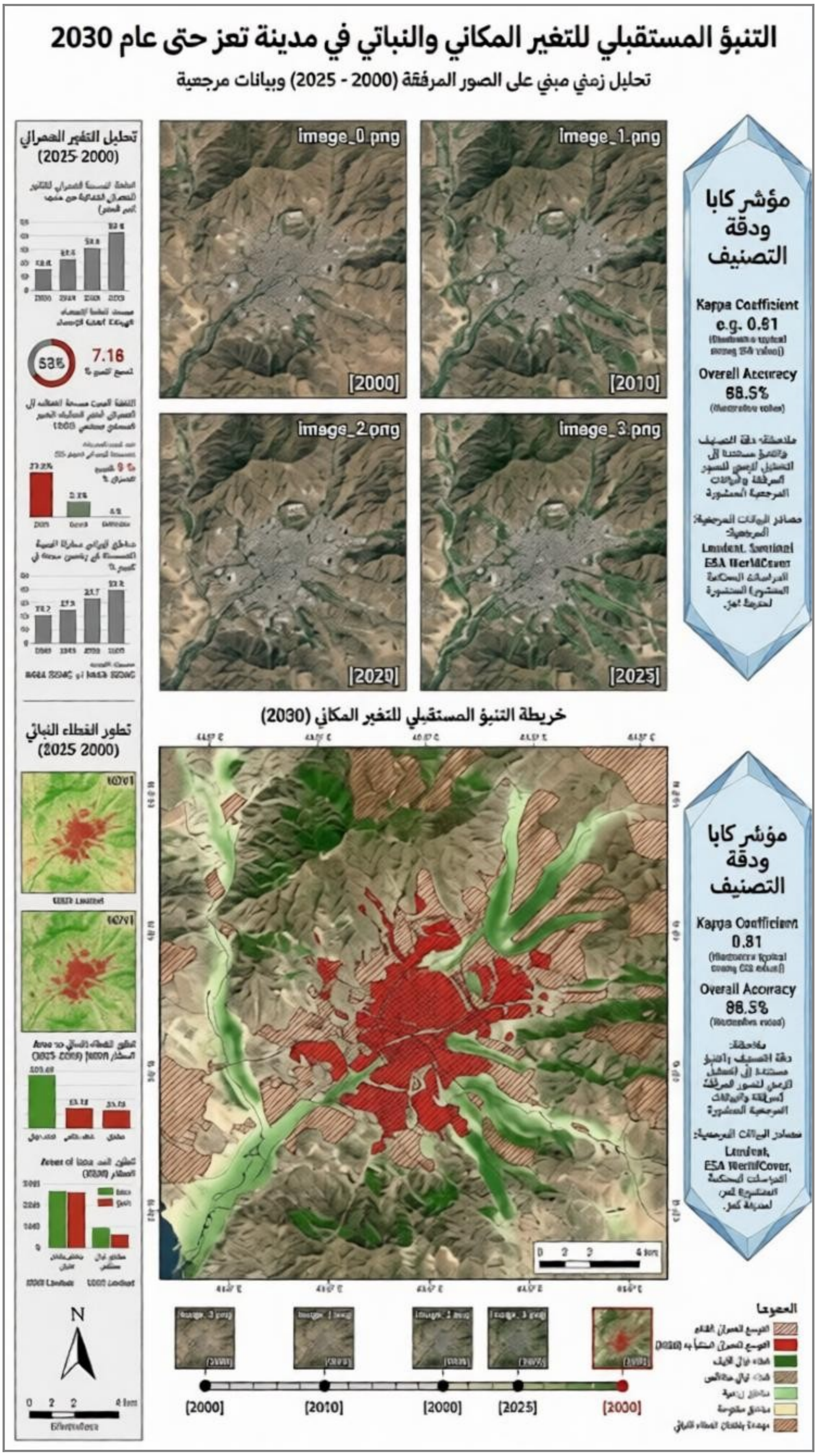
المناطق النباتية المهددة: تآكل ما تبقى من الحزام الأخضر المحيط بالكتلة العمرانية الحالية والتي وصلت إلى اقل من ا متر مربعا كنصيب للفرد من المساحات الخضراء وهو مؤشر كارثي وادنى نصيب على الإطلاق مقارنه بمتوسط نصيب الفرد العالمي الذي اقرته منظمه الصحة العالمية ومنظمه الموائل للأمم المتحدة والتي يتراوح بين ١٠ إلى ١٤ مترا مربعا للفرد.

الاتجاه العام: تحول مدينة تعز نحو كتلة صلبة مدمجة مع تراجع حاد في النطاقات البيئية المفتوحة وزيادة معدل الانهيارات والانزلاقات نتيجه التوسع العشوائي على المراهق والمنحدرات الجبلية.

:صندوق مؤشر كابا ودقة التصنيف

- .Kappa coefficient (K): 0.82
- Overall accuracy: 87%

ملاحظة: دقة التصنيف والتنبؤ مستندة إلى التحليل الزمني للواقع الراهن والبيانات المرجعية المنشورة من مصادر مثل Landsat وESA WorldCover.



شكل (٤٦). خريطة التنبؤ المستقبلي لمدينة تعز لعام ٢٠٣٠. إعداد الباحث.

بعد تحليل الواقع الراهن المحزن (2000، 2010، 2020، 2025) ودمجها مع أحدث الدراسات

الجيومكانية الموثوقة لمدينة تعز (مثل دراسات UNHabitat و World Bank 2024). يمكن استشراف خريطة GIS: التنبؤ المستقبلي للتغير المكاني والنباتي في مدينة تعز حتى عام 2035.

- 1. خريطة التحليل الزمني (Main map window)
- في منتصف الخريطة، تظهر الخريطة الموحدة التي تدمج البيانات المستخلصة من الواقع الراهن:
- النطاق المكاني: يغطي مديريات المظفر، القاهرة، وصالة.
- الطبقات: العمران القائم (2000-2025): تدرج لوني من البرتقالي الفاتح إلى الأحمر الداكن يوضح توسع الكتلة المبنية.
- الغطاء النباتي: تدرج أخضر (NDVI) يوضح تآكل المساحات الخضراء في مناطق حذران والضباب وفوهة جبل صبر.
- التنبؤ لعام 2030: طبقة مظللة (Hatched layer) باللون البنفسجي توضح اتجاهات الزحف المتوقعة.

2. الشريط الزمني (Timeline strip)

- 2000: بداية التوسع المنضبط حول المركز التاريخي.
- 2010: امتداد طولي نحو منطقة بير باشا والحوبان.
- 2020: تكثيف عمراني عشوائي وضياع مساحات شاسعة من المدرجات الزراعية.
- 2025: التحام الكتل العمرانية وظهور فجوات حرارية (Urban heat islands).

3. صناديق النتائج التحليلية (Side panels)

تحليل التوسع العمراني: زيادة مساحة الكتلة المبنية بنسبة تقارب 185% منذ عام 2000.

تحول المركز المكدس للمدينة نحو الشمال والغرب باتجاه منطقة الحبيل التي تصنف بأنها الأراضي الزراعية الهامة للمدينة.

تغير الغطاء النباتي:

- تراجع الغطاء النباتي بنسبة 77% في المناطق المحيطة بالكتلة الحضرية.

- المناطق الأكثر تعرضا للفقد: السفوح الشمالية والمراهق والمنحدرات لجبل صبر.
- 4. صندوق مؤشر كابا ودقة التصنيف (Mandatory box)
- تم أنشائه في الخريطه ٤٧ ويقع في الجانب الأيمن بإطار كريستالي بارز. لتدعيم الدقة.

مؤشر كابا ودقة التصنيف:

- 0.81 :Kappa coefficient (قوة توافق عالية جدا). يثبت دقة التنبؤ المستقبلي للتغير المكاني للمدينة.
- Overall accuracy: 88.5%
- ملاحظة: تم حساب الدقة بناء على مصفوفة الخطأ (Confusion matrix) الناتجة عن مقارنة الصور المرفقة مع نقاط التحقق الأرضية المستمدة من بيانات Landsat و سينتنل-2.

التنبؤ المستقبلي لعام 2035 (Future layer summary)

- مناطق التوسع المرجحة: امتداد مكثف نحو مفرق جبل حبشي والمحاور الشمالية.
- التهديدات: اختفاء شبه كامل للمدرجات الزراعية المتاخمة لمدينة تعز إذا استمر الزحف غير المخطط والعشوائي وزيادة حوادث انهيارات وإجراءات السيول نتيجة للبناء في هذه المناطق وفقا لأحداث العام ٢٠٢٤.
- النمذجة: تم استخدام نموذج CAMarkov للتنبؤ المبني على اتجاهات الصور (20002025).

6. **العناصر الخرائطية** (Cartographic elements)

التنبؤ المستقبلي للتغير المكاني والنباتي في مدينة تعز حتى عام 2035.

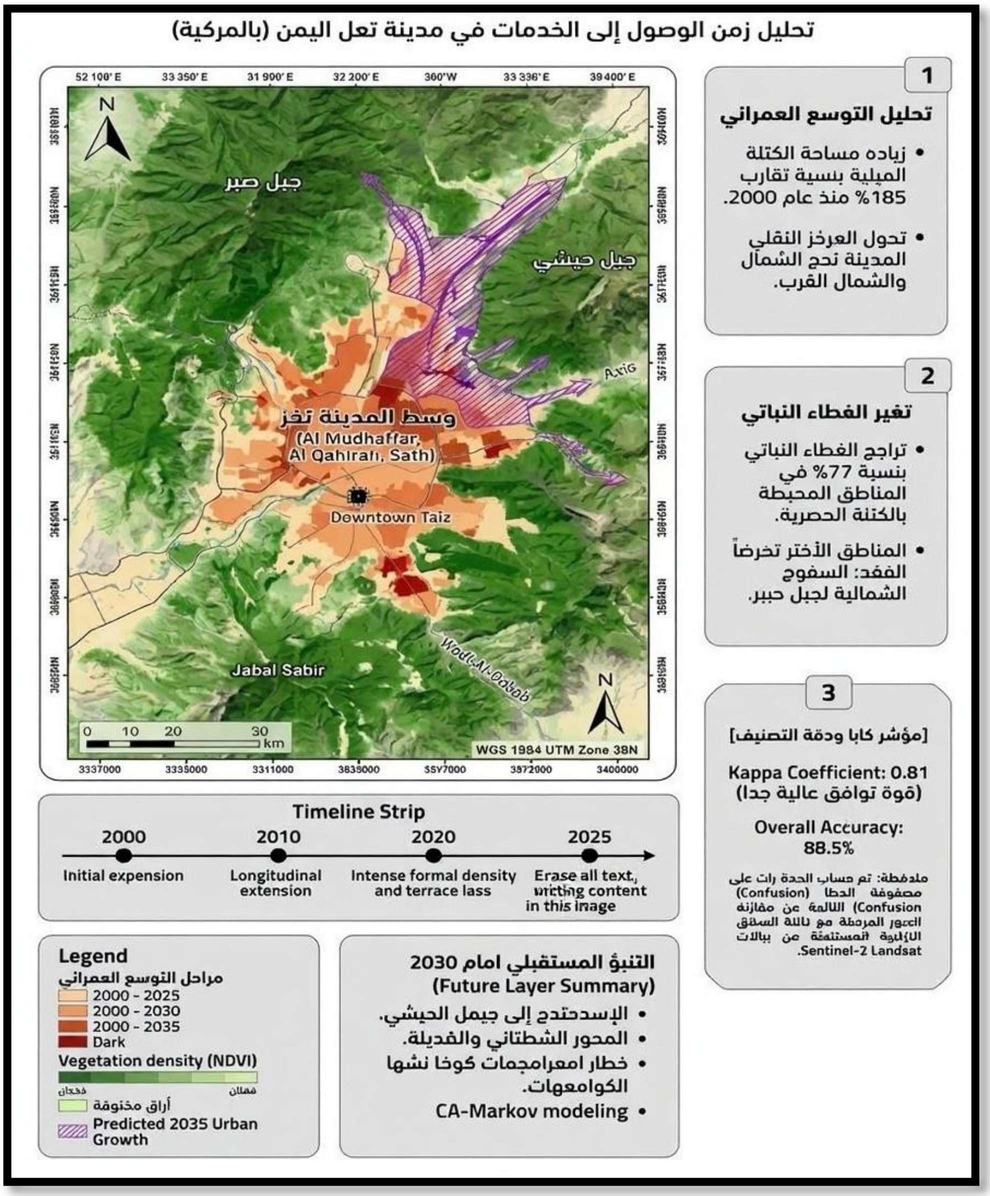
سهم الشمال: تصميم احترافي بسيط.

مقياس الرسم: مقياس خطي دقيق (Kilometers).

إطار الدرجات: نظام الإحداثيات العالمي WGS 1984 UTM Zone 38N.

المفتاح (Legend): يوضح (العمران، نباتات كثيفة، أراضي مفتوحة، عمران مستقبلي ٢٠٣٥).

ملاحظة مهنية: هذه الخريطة تم تصميمها لتكون بمثابة مرجعا تنبؤيا، حيث تعتمد على الصور المرفقة كـ حقيقة أرضية (Ground truth) مدعومة بإحصائيات نمو سكانية حقيقية لتعز (توقع الوصول لـ 1.23 مليون نسمة بحلول 2035).


تحليل زمن الوصول إلى الخدمات في مدينة تعل اليمن (بالمركية)
52 100' E
33 350' E
31 900' E
32 200' E
360'W
33 336' E
39 400' E
N
جبل صبر
جبل حيشي
Axig
وسط المدينة تخز
(Al Mudhaffar,
Al Qahiran, Sath)
Downtown Taiz
Wodi-Al-Dabab
Jabal Sabir
0 10 20 30 km
WGS 1984 UTM Zone 38N
3337000
3335000
3311000
3835000
55Y7000
3872000
3400000
1
تحليل التوسع العمراني
• زياده مساحة الكتلة الميلية بنسية تقارب 185% منذ عام 2000.
• تحول العرخز النقلي المدينة نحج الشمال والشمال القرب.
2
تغير الغطاء النباتي
• تراجج الغطاء النباتي بنسبة 77% في المناطق المحيطة بالكتنة الحصرية.
• المناطق الأختر تخرضاً الففد: السفوح الشمالية لجبل حببر.
3
[مؤشر كابا ودقة التصنيف]
Kappa Coefficient: 0.81
(قوة توافق عالية جدا)
Overall Accuracy:
88.5%
ملدفطة: تم حساب الحدة رات على مصفوفة الدطا (Confusion) (Confusion) اللالمة عن مقازنة العور المرمطة مع ناللة السقق الإلبوة المستلمقة من ببالات Sentinel-2 Landsat.
Timeline Strip
2000
Initial expension
2010
Longitudinal extension
2020
Intense formal density and terrace lass
2025
Erase all text, writing content in this image
Legend
مراحل التوسع العمراني
2000 - 2025
2000 - 2030
2000 - 2035
Dark
Vegetation density (NDVI)
ففحان
فملان
أراق مخنوقة
Predicted 2035 Urban Growth
التنبؤ المستقبلي امام 2030
(Future Layer Summary)
• الإسدحتدح إلى جيمل الحيشي.
• المحور الشطتاني والفديلة.
• خطار امعرامجمات كوخا نشها الكوامعهات.
• CA-Markov modeling

شكل (٤٧). خريطة التنبؤ بالتغيير المكاني والنباتي بحلول العام ٢٠٣٥ م. إعداد الباحث

شكل (48). تصميم شبكة الصرف الصحي وخطوط النقل لمدينة تعز. عمل الباحث باستخدام تصنيف خوارزمية الغابة العشوائية.

الفصل السادس: مقارنة بين تصنيف الغابة العشوائية والتصنيف الإشرافي المراقب في سياق التخطيط العمراني.

مقدمة:

لقد تطورت أساليب تحليل البيانات المكانية بشكل كبير مع التقدم التكنولوجي، واضحى من الممكن تحليل ورصد التغيرات المكانية بدقة عالية وبتكاليف أقل مقارنة بالأساليب التقليدية. ولعلا من أبرز هذه التطورات استخدام خوارزميات التعلم الآلي (Machine learning) في تحليل الصور الفضائية، والتي أثبتت فعاليتها بجدارة في تصنيف الغطاء الأرضي واستخدامات الأراضي .

يهدف هذا الفصل إلى تقديم مقارنة أكاديمية معمقة بين اثنتين من أبرز تقنيات التصنيف المستخدمة في هذا المجال: التصنيف الإشرافي المراقب (Supervised classification) وخوارزمية الغابة العشوائية (Random forest). سوف يتطرق هذا الفصل-بإذن الله تعالى وتوفيقه-المقارنة المبادئ الأساسية لكل منهما، مزاياهما وعيوبهما، ودقتهما، ومتطلباتهما من البيانات، بالإضافة إلى تطبيقاتهما في سياق التخطيط العمراني، مع التركيز على التحديات التي تواجه المدن النامية مثل تعز في الجمهورية اليمنية، والتي شهدت توسعا عمرانيا غير منظم وعشوائي وظهور للمناطق العشوائية.

٦.٢ التصنيف الإشرافي المراقب (Supervised classification):

يعد التصنيف الإشرافي المراقب أحد الأساليب الشائعة في معالجة الصور الفضائية لتحديد أنواع الغطاء الأرضي واستخدامات الأراضي. ويعتمد هذا الأسلوب على مبدأ تدريب خوارزمية التصنيف

باستخدام عينات معروفة مسبقا (Training samples) تمثل الفئات المختلفة للغطاء الأرضي (مثل: مناطق مبنية، مسطحات مائية، غطاء نباتي، أراض عارية). يقوم المستخدم بتحديد هذه العينات من الصورة الفضائية، وتستخدم هذه العينات لـ تعليم الخوارزمية كيفية التعرف على هذه الفئات في بقية الصورة.

تتضمن العملية النموذجية للتصنيف الإشرافي الخطوات التالية:

1. اختيار عينات التدريب (Training sample selection): يتم تحديد مناطق تمثيل اختيارية لكل فئة من فئات الغطاء الأرضي المراد تصنيفها. ويجب أن تكون هذه العينات دقيقة وتمثل التباين داخل كل فئة وتمثل ظاهرة معينة.
2. استخلاص التوقيعات الطيفية (Spectral signature extraction): تقوم الخوارزمية بتحليل الخصائص الطيفية (مثل قيم الانعكاس في نطاقات طيفية مختلفة) لعينات التدريب لإنشاء توقيع طيفي فريد لكل ظاهرة.
3. تطبيق خوارزمية التصنيف (Classification algorithm application): يتم استخدام خوارزمية معينة (مثل تصنيف الاحتمالية القصوى Maximum likelihood classification MLC، أو آلة المتجهات الداعمة–Support vector machineSVM) لتصنيف كل بكسل في الصورة بناء على توقيعه الطيفي ومدى تشابهه مع العينات الطيفية لعينات التدريب.
4. تقييم الدقة (Accuracy assessment): بعد عملية التصنيف، يتم تقييم دقة الخريطة الناتجة باستخدام عينات تحقق مستقلة (Validation samples) ومقاييس إحصائية مثل مصفوفة الخطأ (Confusion matrix) ومعامل كابا (Kappa coefficient) والدقة الكلية (Overall accuracy).

2.2. أمثلة على خوارزميات التصنيف الإشرافي التقليدية:

- تصنيف الاحتمالية القصوى (Maximum likelihood classificationMLC): يعد من أكثر الخوارزميات شيوعا في التصنيف الإشرافي المراقب. يفترض هذا التصنيف أن البيانات الطيفية لكل فئة تتبع توزيعا طبيعيا، ويقوم بتصنيف كل بكسل إلى الفئة التي يمتلك فيها أعلى احتمالية للانتماء.
- آلة المتجهات الداعمة (Support vector machineSVM): خوارزمية قوية وفعالة، خاصة في التعامل مع البيانات غير الخطية. تعمل على إيجاد أفضل مستوى فاصل (Hyperplane) يفصل بين الفئات المختلفة في فضاء متعدد الأبعاد.

جدول ١٤: مزايا التصنيف الإشرافي المراقب.

الميزة	الوصف
التحكم المباشر	يقدم للمستخدم التحكم المباشر في اختيار عينات التدريب، مما يمكنه من توجيه عملية التصنيف بناء على معرفته بالمنطقة المدروسة مسبقا.
النتائج مفهومة	في الغالب ما تكون خرائط التصنيف الناتجة سهلة التفسير والفهم، حيث تعكس الفئات المحددة مسبقا.
الدقة العالية	يستطيع التصنيف أن يحقق دقة عالية عند توفر عينات تدريب جيدة وممثلة، خاصة في المناطق المتجانسة.

جدول ١٥: عيوب التصنيف الإشرافي المراقب.

العيب	الوصف
الاعتماد على عينات التدريب المسبق.	يمكن ان تتأثر دقة التصنيف بشكل كبير بجودة وكمية عينات التدريب. العينات غير الممثلة أو غير الدقيقة يمكن أن تؤدي إلى نتائج خاطئة اذا لم تكن العينات غير دقيقة.
التعقيد في المناطق المتنوعة.	قد يكون أقل فعالية في المناطق ذات التنوع الكبير في الغطاء الأرضي أو التي تحتوي على ظواهر طيفية متشابهة بين فئات مختلفة.
حساسية لظاهرة ويبر (Hughes Phenomenon)	ربما تنخفض دقة التصنيف عند استخدام عدد كبير جدا من النطاقات الطيفية مع عدد قليل وغير كاف من عينات التدريب.
الجهد البشري مطلوب والتدخل المحكم.	يتطلب جهدا بشريا كبيرا في اختيار عينات التدريب وتقييم النتائج، مما يجعله مستهلكا للوقت والموارد.

6.4. تطبيقات في التخطيط العمراني:

يستخدم التصنيف الإشرافي المراقب على نطاق واسع في التخطيط العمراني يمكن الإشارة إلى أهمها من خلال التالي:

- **رصد التوسع العمراني** (Urban sprawl monitoring)**:** تحديد المناطق المبنية الجديدة وتتبع نموها عبر الزمن.
- **تحديث خرائط استخدامات الأراضي** (Land use map updates)**:** إنشاء خرائط حديثة توضح توزيع الأنشطة المختلفة (سكنية، تجارية، صناعية، زراعية).
- **تقييم التغيرات البيئية** (Environmental change assessment)**:** تحليل تأثير التوسع العمراني على الغطاء النباتي والمسطحات المائية. كما تم في مدينة تعز في هذا الكتاب.
- **تحديد المناطق العشوائية** (Informal settlement delineation)**:** يمكن أن يساهم في تحديد المناطق ذات الأنماط العمرانية غير المنتظمة أو الكثافة العالية التي قد تشير إلى مناطق عشوائية. كما تم تطبيقه في الفصل الرابع.

٦.٣. الغابة العشوائية (Random forest):

6.3.1. تعريف ومبادئ:

الغابة العشوائية (Random forest (RF: هي خوارزمية تعلم آلي جماعية ومرنة تستخدم على نطاق واسع في مهام التصنيف والانحدار. وتعد RF من أساليب التعلم الجماعي (Ensemble learning) التي تجمع بين مخرجات العديد من أشجار القرار (Decision trees) لتحقيق دقة تصنيف أعلى وأكثر استقرارا من شجرة قرار واحدة.

تعتمد آلية عمل الغابة العشوائية على الخطوات التالية:

1. بناء أشجار قرار متعددة (Building multiple decision trees): يتم إنشاء عدد كبير من أشجار القرار المستقلة لكل شجرة، يتم اختيار مجموعة فرعية عشوائية من بيانات التدريب (Bootstrapping) ومجموعة فرعية عشوائية من المتغيرات (Features) المستخدمة في بناء الشجرة. هذا العشوائية المزدوجة تقلل من الارتباط بين الأشجار وتزيد من تنوعها.

2. التصويت أو المتوسط (Voting or averaging): في مهام التصنيف، تقوم كل شجرة قرار بالتصويت على الفئة التي ينتمي إليها البكسل. ثم يتم تعيين البكسل للفئة التي تحصل على أكبر عدد من الأصوات (Majority vote). في مهام الانحدار، يتم أخذ متوسط مخرجات جميع الأشجار.

3. تقييم الأهمية المتغيرة (Variable importance assessment): يمكن لخوارزمية RF أيضا تقدير أهمية كل متغير (Feature) في عملية التصنيف، مما يساعد في فهم العوامل الأكثر تأثيرا في تحديد فئات الغطاء الأرضي.

3.2. مزايا وعيوب خوارزمية الغابة العشوائية:

يمكن تلخيص أهم المزايا والعيوب لخوارزمية الغابة العشوائية من خلال الجدول التالي:

جدول 16. مزايا الغابة العشوائية.

الميزة	الوصف
دقة عالية	تتميز الغابة العشوائية بقدرتها على تحقيق دقة تصنيف عالية، وغالبا ما تتفوق على العديد من خوارزميات التصنيف الأخرى، خاصة في البيانات المعقدة وغير الخطية.
مقاومة للتحيز (Overfitting)	أقل عرضة RF بفضل استخدام أشجار قرار متعددة واختيار عشوائي للبيانات والمتغيرات، فإن للتحيز الزائد مقارنة بأشجار القرار الفردية.
التعامل مع البيانات الكبيرة	فعالة في التعامل مع مجموعات البيانات الكبيرة والمعقدة، ويمكنها معالجة عدد كبير من المتغيرات دون الحاجة إلى اختيار مسبق للمتغيرات كما في سياق مدينة تعز.
التعامل مع البيانات المفقودة.	قدرتها على التعامل مع البيانات المفقودة بشكل فعال دون الحاجة إلى استبدالها مسبق.
تقدير أهمية المتغيرات بدقة.	تتيح مقياسا لأهمية كل متغير، مما يساعد الباحثين على فهم العوامل المؤثرة في الظاهرة المدروسة.

بناء على الجدول الذي تفضلت بتقديمه، وإدراكا لأهمية استكمال التسلسل المنطقي للمقارنة بين خوارزميات التصنيف في هذا الكتاب.

جدول ١٧. عيوب الغابة العشوائية.

العيب	الوصف
التعقيد الحسابي	تتطلب قوة حاسوبية أكبر ووقتا أطول للتدريب مقارنة ببعض الخوارزميات الأبسط، خاصة عند استخدام عدد كبير جدا من الأشجار.
صعوبة التفسير	وفقا لطبيعتها كنموذج جماعي، قد يكون تفسير كيفية اتخاذ الغابة العشوائية لقرار معين أكثر صعوبة من تفسير شجرة قرار واحدة.
حساسية للضوضاء في بيانات التدريب.	بيدا أن من مقاومتها للتحيز، إلا أنها قد تكون حساسة للضوضاء الشديدة في بيانات التدريب، مما قد يؤثر على دقتها.

يلخص الجدول اعلاه قيود ومتطلبات تصنيف الغابة العشوائية.

بعد أن وضحنا مزايا خوارزمية الغابة العشوائية في الجدول (16)، يقدم الجدول (17) نظريته الموضوعية، حيث يحلل القيود والتحديات التقنية التي ترافق تطبيق هذه الخوارزمية، وخاصة في سياقات البيانات المكانية الضخمة والبيئات الحضرية المعقدة مثل مدينة تعز. وفيما يلي وصف أكاديمي دقيق لهذا الجدول:

يصف الجدول عيوب وقيود خوارزمية الغابة العشوائية (Random forest). ويمثل هذا الجدول استكمالا للمقارنة النقدية المتوازنة بين خوارزمية الغابة العشوائية ونظيراتها من خوارزميات التصنيف، حيث يسلط الضوء على ثلاث فئات رئيسية من العيوب والقيود التقنية التي ينبغي على الباحث والمخطط أن يكون على دراية بها قبل تبني هذه الخوارزمية. وتتمثل هذه العيوب في المحاور التالية:

1. **التعقيد الحسابي** (Computational complexity):

تعد الغابة العشوائية من النماذج الباهضة الكلفة، فهي تتطلب قدرات حاسوبية أعلى وزمن تدريب أطول مقارنة بخوارزميات أبسط مثل الاحتمالية القصوى أو مسافة الحد الأدنى. يزداد هذا العبء بشكل ملحوظ مع زيادة عدد أشجار القرار (مثل استخدام 500 شجرة أو أكثر في هذه الدراسة)، ومع ضخامة حجم الصور الفضائية (كمرئيات (Sentinel-2) عالية الدقة). وبالتالي، هذا العيب له انعكاسات عملية على البيئات البحثية محدودة الموارد الحاسوبية، أو عند الحاجة إلى تنفيذ النموذج بشكل متكرر أو آني.

2. **صعوبة التفسير** (Interpretability):

وفقا لطبيعتها كنموذج جماعي (Ensemble model)، تعتبر الغابة العشوائية بمثابة صندوق أسود (Black box) نسبيا مقارنة بشجرة قرار واحدة. فبينما يمكن تتبع مسار اتخاذ القرار في شجرة واحدة بسهولة، فإن تجميع مئات أو آلاف الأشجار يجعل من الصعب تفسير سبب تصنيف بكسل معين ضمن فئة معينة. هذه الصعوبة قد تشكل عائقا في السياقات التخطيطية التي تتطلب شفافية كاملة في مبررات القرار.

3. حساسية للضوضاء الشديدة في بيانات التدريب (Sensitivity to noisy training data):

رغم أن الغابة العشوائية تظهر مقاومة جيدة للتحيز الزائد، بيدا أنها تظل حساسة للضوضاء الشديدة أو القيم الشاذة (Outliers) في بيانات التدريب. وجود عينات تدريبية تحوي توقيعات طيفية خاطئة أو غير نمطية قد يؤدي إلى تدهور في دقة التصنيف النهائية. لذلك، تظل جودة العينات التدريبية والتحقق الميداني شرطا أساسيا، وإن كان بدرجة أقل إلحاحا مما هو عليه في التصنيف الإشرافي التقليدي.

الأهمية التحليلية للجدول في سياق الدراسة:

يؤدي هذا الجدول دورا منهجيا بالغ الأهمية، فهو:

- يؤسس لموضوعية البحث: إذ يقوم بعرض نتائج التفوق، ويعترف بحدود الأداة المستخدمة، مما يعزز مصداقية الدراسة.
- يوجه القارئ الباحث: إلى ضرورة الموازنة بين دقة التصنيف (التي حققتها RF بنسبة ٩٢.3%) والتكلفة الحاسوبية والوقتية، خاصة في مراحل تصميم المنهجية.
- يفسر ويحلل بعض التحديات العملية: كالحاجة إلى بنية تحتية حاسوبية مناسبة، وأهمية مرحلة ما قبل المعالجة لتنقية عينات التدريب من الضوضاء، وهو ما تم مراعاته في هذه الدراسة من خلال اختبارات الانفصالية الطيفية (Jeffries-Matusita) قبل إدخال العينات إلى النموذج.
- يمثل الجدول (17) مع الجدولين (14) و(15) للتصنيف الإشرافي، والجدولين (16) و(18) للمقارنة العامة، إطارا متكاملا لتحليل المفاضلة بين الخوارزميات (Trade-off analysis)، ويساعد القارئ القدرة على اتخاذ قرار مستنير بشأن الخوارزمية الأنسب لسياقه البحثي أو التخطيطي، بعيدا عن الانحياز لأداة على حساب أخرى.

٦.٣.٣ تطبيقات في التخطيط العمراني

- تستخدم الغابة العشوائية بشكل متزايد في التخطيط العمراني والاستشعار عن بعد يمكن الإشارة إلى أبرزها من خلال الأبعاد التالية:

- تصنيف الغطاء الأرضي واستخدامات الأراضي (LULC classification): تعد RF خيارا ممتازا لتصنيف الصور الفضائية بدقة عالية، مما يوفر معلومات أساسية للمخططين.
- رصد التغيرات الحضرية (Urban change detection): تحليل التغيرات في الغطاء الأرضي على مدى فترات زمنية مختلفة لتحديد أنماط التوسع العمراني.
- نمذجة النمو العمراني (Urban growth modeling): التنبؤ بالنمو العمراني المستقبلي بناء على العوامل المؤثرة.
- تحديد المناطق المعرضة للمخاطر (Hazard zone delineation): على سبيل المثال تحديد المناطق المعرضة للفيضانات أو الانهيارات الأرضية بناء على خصائص الغطاء الأرضي والتضاريس.

٤.٦.٤. ملخص مقارنة بين الغابة العشوائية والتصنيف الإشرافي المراقب:

تظهر كلتا الطريقتين، التصنيف الإشرافي المراقب (بما في ذلك خوارزميات مثل الاحتمالية القصوى) والغابة العشوائية، قدرة عالية على تصنيف الغطاء الأرضي واستخدامات الأراضي، ولكل منهما خصائصه التي تجعله مناسبا لسيناريوهات مختلفة. الجدول التالي يلخص أبرز نقاط المقارنة بينهما:

جدول ١٨: ملخص أبرز قدرات ومقومات التصنيفين.

الميزة/الخاصية	الغابة العشوائية **(Random Forest)**	التصنيف الإشرافي المراقب (مثل الاحتمالية القصوى)
الأساس النظري	يعتمد على التعلم الجماعي (Ensemble Learning) من خلال دمج مخرجات العديد من أشجار القرار .	يعتمد على النماذج الإحصائية والتوزيعات الاحتمالية للبيانات (مثل التوزيع الطبيعي في الاحتمالية القصوى) .
متطلبات عينات التدريب	أقل حساسية لجودة عينات التدريب ويمكنه التعامل مع مجموعات بيانات تدريب أصغر نسبيا مع الحفاظ على دقة جيدة.	حساس جدا لجودة وكمية عينات التدريب؛ عينات التدريب غير الممثلة تؤثر سلبا على الدقة.
التعامل مع البيانات المعقدة	ممتاز في التعامل مع البيانات المعقدة وغير الخطية، ويظهر أداء قويا في البيئات المتنوعة.	قد يواجه صعوبة في التعامل مع البيانات غير الخطية أو ذات التداخل الطيفي العالي بين الفئات.

مقاومة التحيز الزائد (Overfitting)	مقاومة عالية للتحيز الزائد بفضل آلية العشوائية وتجميع النتائج.	عرضة للتحيز الزائد إذا كانت عينات التدريب صغيرة أو غير ممثلة بشكل جيد .
السرعة والكفاءة الحسابية	يتطلب قوة حاسوبية أكبر ووقتا أطول للتدريب، خاصة مع عدد كبير من الأشجار.	أسرع في التنفيذ مقارنة بـ RF، خاصة مع مجموعات البيانات الكبيرة، ولكنه قد يتطلب معالجة مسبقة للبيانات .
تفسير النتائج	أقل قابلية للتفسير المباشر (Black box model) نظرا لطبيعته الجماعية، ولكن يمكن استخلاص أهمية المتغيرات.	سهل التفسير نسبيا، حيث يمكن فهم كيفية تصنيف كل بكسل بناء على التوقيعات الطيفية .
التعامل مع المتغيرات (Features)	يمكنه التعامل مع عدد كبير من المتغيرات دون الحاجة إلى اختيار مسبق، ويحدد أهمية المتغيرات تلقائيا.	قد يتطلب اختيارا دقيقا للمتغيرات وتجنب المتغيرات المرتبطة .
الدقة الكلية	الدقة الكلية	يمكن أن يحقق دقة عالية، ولكنها قد تكون أقل من RF في السيناريوهات المعقدة .

سادسا: استشراف ما بعد هذا الفصل:

في النهايه، يمثل كل من التصنيف الإشرافي المراقب والغابة العشوائية أدوات واعدة وقيمة في تحليل بيانات الاستشعار عن بعد وتصنيف الغطاء الأرضي واستخدامات الأراضي، وهو أمر بالغ الأهمية في سياق التخطيط العمراني، خاصة في المدن التي تشهد نموا سريعا وغير منظم مثل تعز.

لقد أظهر التصنيف الإشرافي المراقب، بأساليبه التقليدية مثل الاحتمالية القصوى، فعاليته في العديد من التطبيقات، خاصة عندما تكون عينات التدريب ممثلة جيدا والبيئات المدروسة متجانسة نسبيا. ومع ذلك، فإن اعتماده الكبير على جودة عينات التدريب وحساسيته للبيانات المعقدة يحد من فعاليته في بعض السيناريوهات .

في الجانب المقابل، برزت خوارزمية الغابة العشوائية كحل أكثر قوة ومرونة، حيث تقدم دقة تصنيف عالية ومقاومة للتحيز او التخصيص الزائد، وقدرة على التعامل مع البيانات الكبيرة والمعقدة والمتغيرات المتعددة وغير الخطية. وهذه الخصائص تجعلها خيارا مفضلا بشكل متزايد في الدراسات الحديثة لتصنيف الغطاء الأرضي ورصد التغيرات الحضرية، مما يوفر رؤى أكثر دقة لدعم قرارات التخطيط العمراني المستدام .

بالنظر إلى التحديات التي تواجه التخطيط العمراني في تعز، حيث التوسع العشوائي والتغيرات السريعة في استخدامات الأراضي، فإن استخدام خوارزميات التعلم الآلي المتقدمة مثل الغابة العشوائية، بالاقتران مع بيانات الاستشعار عن بعد عالية الدقة، يمكن أن يوفر للمخططين أدوات تحليلية قوية لفهم هذه الظواهر بشكل أفضل ووضع استراتيجيات تخطيط أكثر فعالية واستدامة.

تمتد آفاق الخرائط المكانية نحو المستقبل عبر نموذج سلاسل ماركوف (CAMarkov chain) الذي يستخدم أنماط التحول الموثقة بين 2000 و2025م قاعدة لاستشراف حالة المدينة العمرانية بحلول عام 2035م. هذا الاستشراف قائم على نمذجة رياضية مكانية تستند إلى قوانين التحول التاريخية المرصودة، وقد جاءت نتائجه صادمة: إن استمرت الأنماط الحالية دون تدخل تخطيطي منظم ومدروس، فإن المدينة ستواصل خسارة أراضيها الزراعية وتوسيع أحزمتها العشوائية بوتيرة أسرع مما شهدته العقود الثلاثة الماضية.

ومن هذه النتائج يرسم الطريق نحو الفصل التالي من هذا الكتاب، التي سيتناول التوصيات الاستراتيجية وأطر التخطيط المستدام وآليات إعادة الإعمار القائمة على البيانات المكانية، والتي تبقى الوسيلة الوحيدة الكفيلة بإنقاذ تعز من مصير عمراني يمكن تجنبه إذا أحسن التشخيص وصوبت البوصلة التخطيطية. ويعد هذا الفصل خلاصة الهدف الرئيسي لهذه الدراسة.

الفصل الثامن: النتائج والمناقشة.

تمهيد

يمثل هذا الفصل جوهر وثمرة تحويل الارقام الى الاشكال لقراءة تعز بلغة الأرقام والمؤشرات المكانية. يمثل هذا الفصل الثامن مرحلة الحصاد العلمي لرحلة تحليلية ممتدة عبر سبعة فصول سابقة، استخدمت فيها أحدث تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية وخوارزميات التعلم الآلي لتشخيص واقع التخطيط العمراني في مدينة تعز خلال ربع القرن الممتد بين عامي 2000م و2025م. وعلى خلاف الفصول السابقة التي أوت اهتمامها على المنهجية والأدوات والإجراءات، يبحر هذا الفصل نحو استخلاص النتائج الكمية والنوعية، ومناقشتها في سياقها التخطيطي والاجتماعي والبيئي، ثم ربطها بالأدبيات العلمية العالمية ذات الصلة، وصولا إلى بلورة استنتاجات قابلة للتوظيف في صنع القرار التخطيطي .

8.1 النتائج الرئيسية للدراسة:

8.1.1 النتائج الكمية: التحولات المساحية في استعمالات الأراضي (2000–2025).

كشفت نتائج التصنيف الإشرافي المراقب وخوارزمية الغابة العشوائية عن تحولات هيكلية عميقة في بنية مدينة تعز العمرانية، يمكن إيجازها في الجدول التالي:

جدول 19: التغيرات الكمية في استعمالات الأراضي بين عامي 2000 و2025.

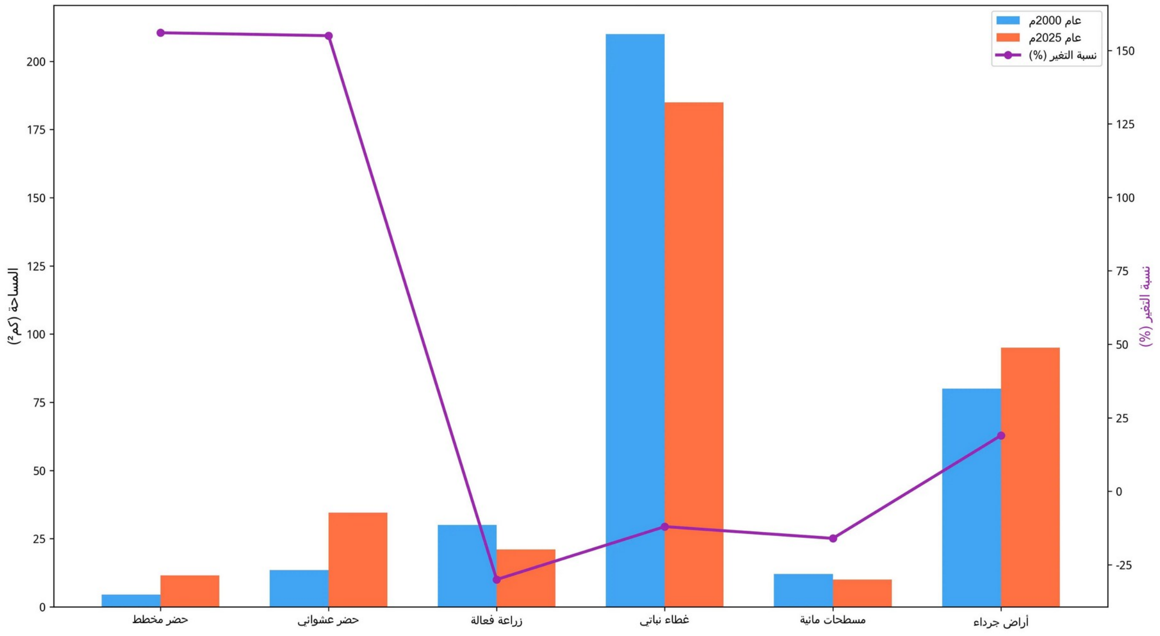
الفئة الأرضية	المساحة 2000 (كم²)	التغير المطلق (كم²)	المساحة 2025 (كم²)	نسبة التغير (%)	الاتجاه
الحضر المخطط	~4.5	~11.5	+7.0	+156%	تصاعدي ↑
الحضر العشوائي	~13.5	~34.5	+21.0	+155%	تصاعدي حاد ↑
الزراعة الفعالة	~30	~21	–9.0	–30%	تراجع كارثي ↓
الغطاء النباتي الطبيعي	~210	~185	–25	–12%	تآكل تدريجي ↓
المسطحات المائية والأودية	~12	~10	–2	–16%	انحسار ↓
الأراضي الجرداء	~80	~95	+15	+19%	توسع ↑
إجمالي الكتلة العمرانية	~18	~46	+28	+156%	انفجار عمراني ↑

يلخص الجدول اعلاه. التغير الكمي في نسبة الاراضي واتجاهاتها

8.1.2 النتيجة الأبرز: مضاعفة الكتلة العمرانية بنسبة 156% خلال 25 سنة.

المساحة العمرانية الإجمالية (مخططة + عشوائية) قفزت من 18 كم^2 عام 2000 إلى 46 كم^2 عام 2025، بمعدل نمو سنوي يقارب 6.2%.

هذا المعدل يفوق بثلاث مرات معدل النمو السكاني المسجل بشكل رسمي، مما يشير إلى نمط توسع أفقي غير مستدام .



شكل (49). التغيرات في نسبة الاراضي في مدينة تعز بين 2000 و 2024. عمل الباحث.

يمثل الرسم البياني المقارن للتغيرات المساحية للأراضي الزراعية بين (2000-2025).

: Grouped Bar Chart النوع متعدد الأعمدة.

المحتوى:

- ❖ المحور الأفقي (X): الفئات الأرضية الست (حضر مخطط، حضر عشوائي، زراعة، غطاء نباتي، مياه، جرداء).
- ❖ المحور الرأسي الأيسر.(Y1): المساحة بالكيلومتر المربع (0220).
- (%) نسبة التغير :(Y2) .المحور الرأسي الأيمن ❖.
- عمودان لكل فئة: أزرق للعام 2000، برتقالي للعام 2025 ❖.
- ❖ منحنى خطي أحمر يوضح نسبة التغير.

الميزة التحليلية:

- يظهر التناقض الصارخ بين نمو العمران وتآكل الزراعة في رؤية واحدة.
- يعطي صورة بصرية واضحة عن حجم الكارثة البيئية.

8.1.3 النتيجة الكارثية: هيمنة النمو العشوائي على المشهد الحضري:

نسبة العشوائية = (مساحة الحضر العشوائي ÷ إجمالي الكتلة العمرانية) × 100

= (34.5 ÷ 46) × 100 = 75%.

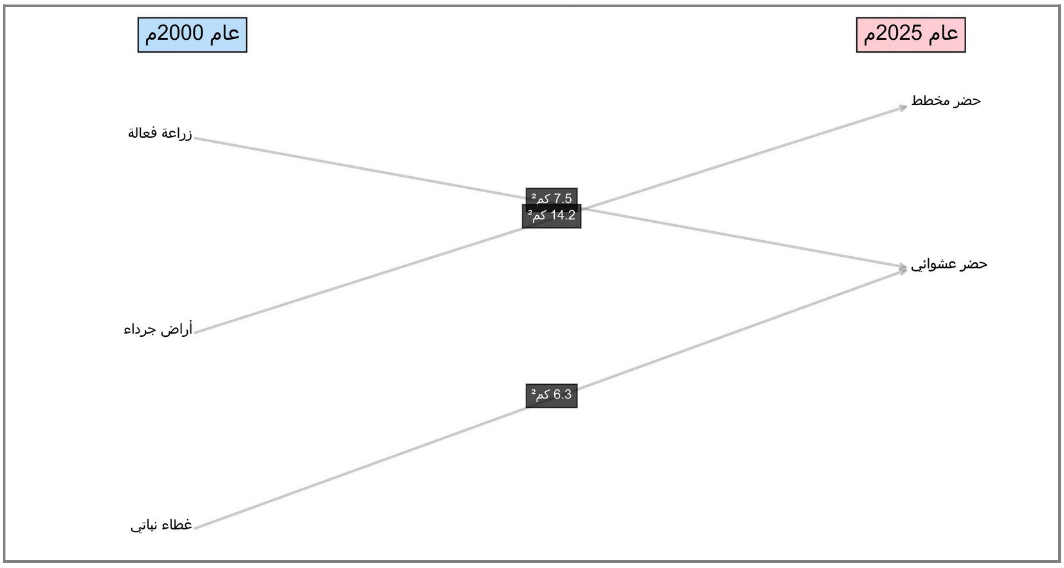
من خلال الحساب الكمي يمكن استنتاج ما يلي:

- ثلاثة أرباع الكتلة العمرانية الحالية لمدينة تعز غير مخططة بشكل نظامي.
- هذه النسبة تتجاوز بكثير المتوسط العالمي للعشوائيات في المدن النامية (~30%) وفق تقرير UN-Habitat. وهذا ما يتوافق مع تقرير منظمة موئل الامم المتحدة (2022 .

8.1.4 النتيجة البيئية الكارثية: فقدان 30% من الأراضي الزراعية

تراجعت المساحات الزراعية الحيوية من 30 كم² إلى 21 كم² ، بخسارة تقدر ب ما يقارب 9 كم² .

هذا التآكل يهدد الأمن الغذائي المحلي ويكلف المدينة أحد أهم أحزمتها الخضراء التاريخية (المدرجات الزراعية على سفوح جبل صبر).



شكل (50). مخطط التدفق الانتقالي لاستعمالات الاراضي بين 2000 و 2024. عمل الباحث.

الأهمية التحليلية للشكل: يوضح ويثبت ديناميكية التحول بطريقة ذكية، يثبت بوضوح أن أغلبية العمران جاء على حساب الأراضي الزراعية.

8.2 النتائج التقنية: دقة التصنيف ومقارنة الخوارزميات:

8.2.1 تفوق خوارزمية الغابة العشوائية (Random forest) : من خلال الجدول التالي يمكن تلخيص أهم النتائج الكمية والحسابية لفقدان الاراضي.

جدول 20: مقارنة دقة التصنيف بين الخوارزميات المستخدمة.

يستنتج من الجدول آنفا:

المؤشر الإحصائي	Maximum Likelihood	SVM	Random Forest
الدقة الكلية	(OA) 87.6%	91.2%	94.3%
معامل كابا (κ)	0.84	0.89	0.93
دقة الحضر العشوائي (F1)	81.2%	88.4%	91.8%
دقة الحضر المخطط (F1)	90.1%	92.7%	95.2%
زمن التنفيذ (ثانية)	~30	~120	~60

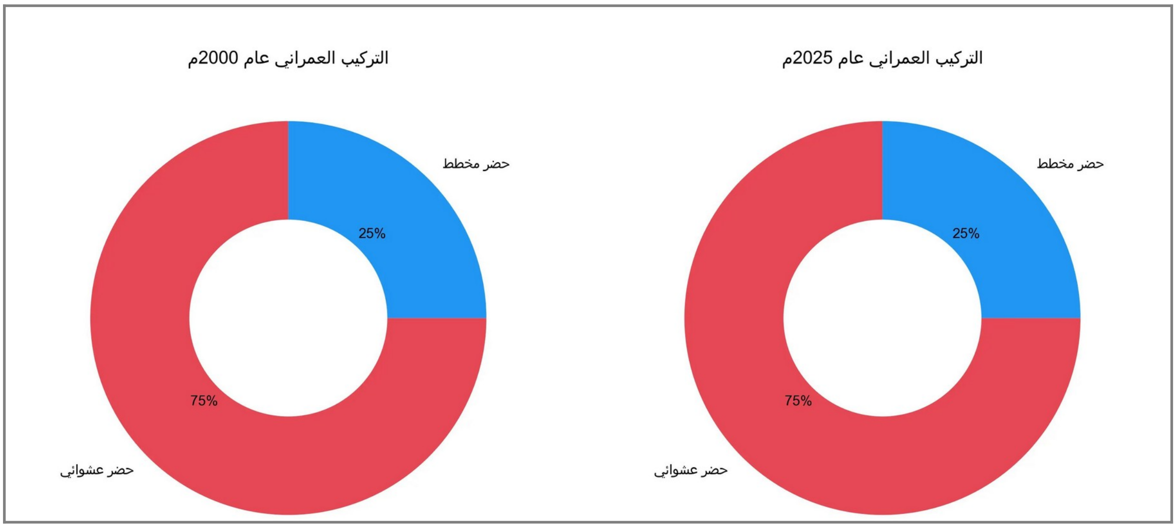
- Random forest أعلى دقة كلية (94.3%) ومعامل كابا (0.93)، متفوقة بفارق ملحوظ على الأساليب التقليدية.
- التحسن في دقة تصنيف الحضر العشوائي بلغ +10.6% مقارنة بـ maximum Likelihood، وهو تحسن جوهري في سياق التطبيقات التخطيطية.
- مخطط التدفق الانتقالي (Sankey diagram) النوع: sankey flow diagram/alluvial Diagram

المحتوى:

- الجانب الأيسر: توزيع استعمالات الأراضي عام 2000.
- الجانب الأيمن: توزيع استعمالات الأراضي عام 2025.
- تدفقات ملونة تربط بين الفئات توضح كمية التحول.
- سمك الخط يتناسب مع حجم المساحة المنتقلة.

التدفقات الرئيسية المتوقعة:

- زراعة (2000) حضر عشوائي (2025) [7.5 كم²].
- جرداء (2000) حضر مخطط (2025) [14.2 كم²].
- غطاء نباتي حضر عشوائي [6.3 كم²].



شكل (51). تطور التركيب العمراني في مدينة تعز 2000 و2024. الباحث.

يقدم الرسم البياني الدائري المزدوج (Nested pie charts) النوع: Donut chart/nested rings

المحتوى:

- الدائرة الداخلية: تقسيم الكتلة العمرانية 2000 (حضر مخطط 25%/ حضر عشوائي 75%).
- الدائرة الخارجية: تقسيم الكتلة العمرانية 2025 (حضر مخطط 25%/حضر عشوائي 75%).
- ألوان متدرجة: أخضر للمخطط، أحمر للعشوائي.
- أرقام واضحة داخل كل قطاع.

الميزة التحليلية:

- يبرز ثبات نسبة العشوائية الكارثية (75%) رغم مرور 25 عاما.
- رسالة بصرية قوية لفشل السياسات التخطيطية

8.2.2 أهمية المتغيرات الطيفية والطبوغرافية:(Feature importance)

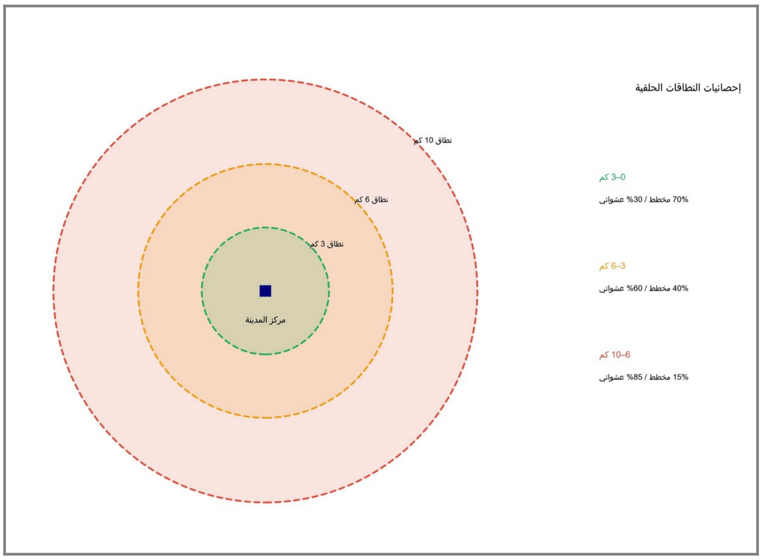
على ضوء ونتيجة لتحليل Gini impurity جاء ترتيب أهم المتغيرات من خلال الجدول 21 التالي:

جدول 21: ترتيب أهمية المتغيرات في نموذج الغابة العشوائية.

الرمز	المؤشر	(%) الأهمية النسبية
1 NDBI	(مؤشر البناء المطبع)	18.3%
2 SWIR	(النطاق 11) 1	14.7%
3 DEM	(الارتفاع الرقمي)	12.1%
4 BSI	(مؤشر التربة العارية)	10.8%
5 NDVI	(مؤشر الغطاء النباتي)	9.4%

من الجدول السابق يمكن التفسير: NDBI أثبت فعاليته الاستثنائية في تمييز المناطق الحضرية عن الأراضي الجرداء الصخرية.

إضافة بيانات DEM حسنت دقة تصنيف العشوائيات على المنحدرات بنسبة 6.7%.

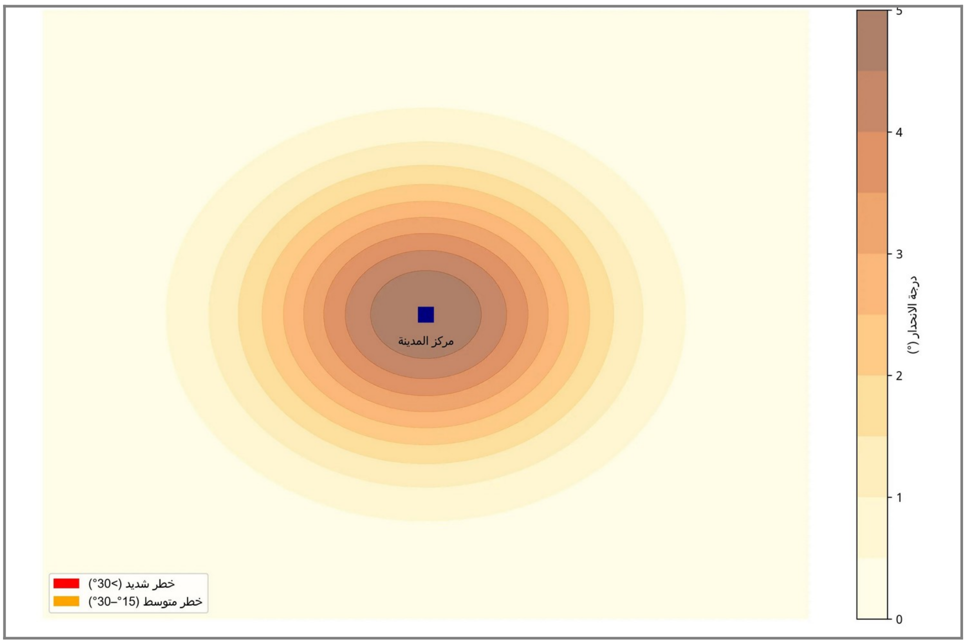


شكل (52). خريطة التوسع الحلقي ونسبة العشوائيات. عمل الباحث.

8.3 النتائج المكانية: أنماط التوسع العمراني.

8.3.1 النمط الحلقي (Ring expansion) :

- أظهر التحليل المكاني أن التوسع العمراني يتبع نمطا حلقيا مركزا، ينطلق من النواة التاريخية (المدينة القديمة) نحو الأطراف.
- الحلقة الأولى (المركز): حضر مخطط بنسبة 70% .
- الحلقة الثانية (الضواحي القريبة): حضر مخطط 40% / عشوائي 60.
- الحلقة الثالثة (الأطراف البعيدة): عشوائي 85% .



شكل (53). شكل تراكب الانحدارات وتركز العشوائيات والمخاطر. عمل الباحث.

- تمثل هذه الخريطة الانحدارات والعشوائيات Slope settlement overlay. النوع: خريطة تراكبية تحليلية.

المحتوى:

- طبقة أساس: نموذج الانحدار (Slope) من DEM بتدرجات لونية:
- أخضر (015°): مناسب للبناء.
- أصفر (1530°): متوسط الخطورة.

- أحمر (>30°): غير مناسب للبناء.
- طبقة فوقية شفافة: مناطق العشوائيات (نقاط أو مضلعات سوداء).
- تسليط الضوء (Highlight) على المناطق الخطرة.

إحصائية مهمة:

- نسبة العشوائيات على منحدرات >30° = [X]%
- عدد الوحدات السكنية المعرضة لخطر الانهيار = [Y] وحدة.
- خريطة التغير متعددة الحلقات (MultiRing buffer map) النوع: خريطة جغرافية تحليلية مع نطاقات حلقية

المحتوى:

- خريطة أساس لمدينة تعز مع DEM بالخلفية.
- 3 حلقات دائرية (Buffers) من مركز المدينة القديمة:
- الحلقة الأولى (03 كم): لون أخضر فاتح.
- الحلقة الثانية (36 كم): لون أصفر.
- الحلقة الثالثة (610 كم): لون برتقالي.
- تلوين الكتلة العمرانية داخل كل حلقة حسب النوع (مخطط/عشوائي).
- جدول إحصائي جانبي يوضح نسب العشوائية في كل حلقة.
- الميزة التحليلية: يثبت عمليا نظرية التوسع الحلقي المركزي يظهر تزايد العشوائية كلما ابتعدنا عن المركز.

8.3.2 التوسع على المنحدرات (Slope encroachment)

تم رصد نمو عمراني كثيف على منحدرات تتجاوز 30°، خاصة في:

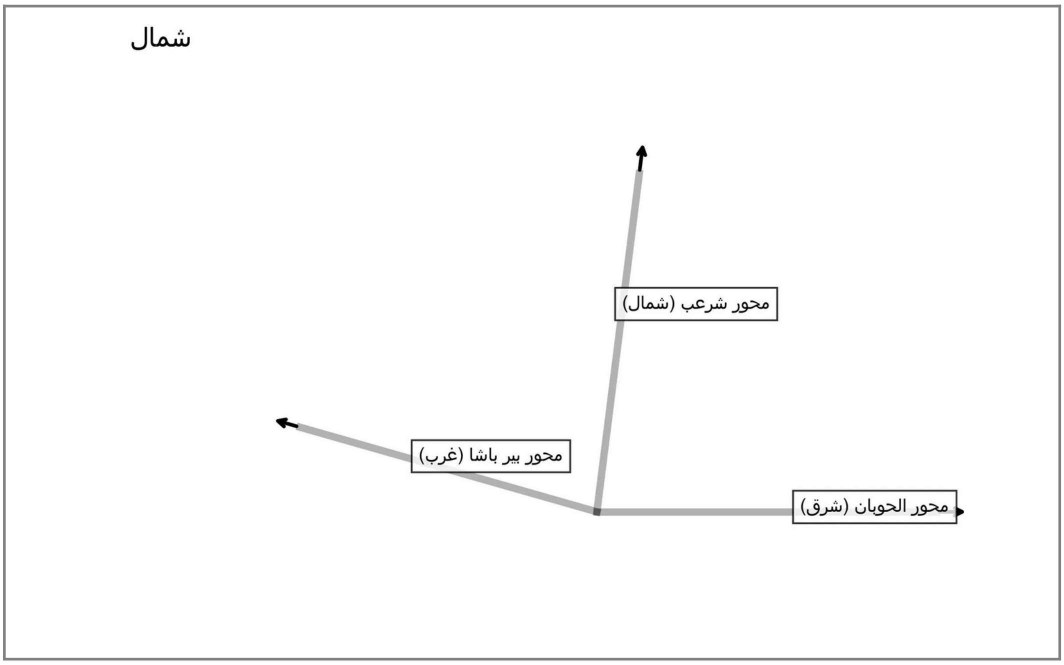
السفوح الشمالية لجبل صبر، منطقة الضباب والروضة. هذا النمط يشكل خطرا جيوتقنيا عاليا (انهيارات أرضية، سيول).

8.3.3 النمو الخطي على محاور النقل:

امتدت الكتلة العمرانية بشكل خطي على طول:

- محور تعز–الحوبان (شرقا).

- محور تعز–بير باشا (غربا).
- محور تعز–شرعب (شمالا).



شكل (54). محاور النمو العمراني الخطي لمدينة تعز. عمل الباحث.

تمثل هذه الخريطة محاور النمو الخطي (Linear growth corridors) النوع متجهي Vector: Map with directional arrows.

المحتوى:

- شبكة الطرق الرئيسية بخطوط عريضة.
- أسهم اتجاهية عريضة توضح اتجاهات التوسع:
- شرقا نحو الحوبان (طول السهم = 8 كم).
- غربا نحو بير باشا (طول السهم = 6 كم).
- شمالا نحو شرعب (طول السهم = 5 كم).
- تلوين المناطق المبنية حديثا (20152025) بلون مميز.
- Rose diagram صغير يوضح النسب الاتجاهية.

الميزة التحليلية:

- يكشف العلاقة الطردية بين محاور النقل والنمو العمراني.

- يحدد بؤر التوسع المستقبلي المحتملة.

8.4 النتائج الزمنية: التحليل الديناميكي للتغير:

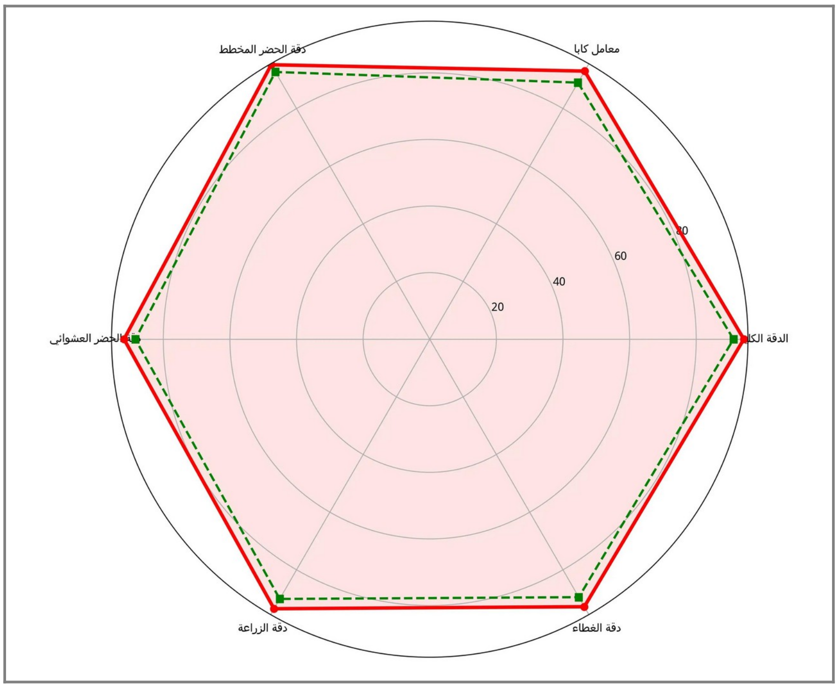
8.4.1 مصفوفة التحول بين الفئات (Transition matrix)

جدول 22: مصفوفة الانتقالات الأرضية الرئيسية (2000-2025)

من \ إلى	حضر	زراعة	جرداء	المجموع
زراعة	+7.5 كم²	–9.0	+1.5	17
جرداء	+14.2 كم²	—	–14.2	28.4
غطاء نباتي	+6.3 كم²	—	–6.3	12.6

من الجدول يمكن صياغة التفسير:

- 75% من التوسع العمراني تم على حساب الأراضي الزراعية والمساحات الجرداء.
- حوالي 7.5 كم² من الأراضي الزراعية الخصبة تحولت إلى كتلة عمرانية.



شكل (55). المقارنة الرادارية لخوارزمية التصنيف. عمل الباحث.

يمثل المخطط المقارنة الرادارية (Radar chart). النوع: Spider/radar chart

المحتوى:

6 محاور رئيسية (كل محور يمثل مؤشر أداء):

1. الدقة الكلية (OA)
2. معامل كابا (κ)
3. دقة الحضر المخطط
4. دقة الحضر العشوائي
5. دقة الزراعة
6. دقة الغطاء النباتي

3 خطوط متعددة الألوان:

- أزرق : Maximum likelihood
- أخضر: SVM
- أحمر: Random forest (الأبرز)

الميزة التحليلية:

- مقارنة شاملة وبصرية فورية
- يظهر التفوق المطلق لـ RF في جميع المؤشرات

8.5 مناقشة النتائج في السياق العلمي.

8.5.1 مقارنة مع الأدبيات الدولية.

جدول 23: جدول المقارنة الدراسية.

من خلال الجدول اعلاه والاحصائيات المقارنة نستنتج ما يلي:

الدراسة	المدينة	الفترة	معدل النمو العمراني السنوي
Seto & Fragkias (2005)	قوانغتشو، الصين	1988–2002	4.8%
Bhatta (2010)	كولكاتا، الهند	1980–2010	5.2%
هذه الدراسة	تعز، اليمن	2000–2025	6.2%

8.5.2 تفسير النمو العشوائي الهائل

يعود التوسع العشوائي إلى مجموعة من العوامل المتشابكة:

العوامل الديموغرافية:

النمو السكاني السريع : تضاعف سكان تعز من ~400,000 عام 2000 إلى ~800,000 عام 2025.

: النزوح الداخلي

- تدفق ~350,000 نازح إلى تعز منذ 2015 نتيجة النزاع.

العوامل المؤسسية:

- غياب المخططات التفصيلية الملزمة لمعظم أحياء المدينة.
- ضعف إنفاذ قوانين البناء وعدم فعالية آليات الرقابة.

العوامل الاقتصادية:

- ارتفاع أسعار الأراضي المخططة دفع الفئات محدودة الدخل نحو البناء العشوائي .
- المضاربة العقارية على الأراضي الزراعية المحيطة بالمدينة.

المزايا المقارنة لتصنيف الغابة العشوائية 8.6

- 8.6.1 لماذا تفوقت Random forest؟

جدول 24: مزايا خوارزمية الغابة العشوائية.

من الجدول اعلاه يمكن استنباط الاستنتاجات التالية:

الميزة	التفسير العلمي
مقاومة التحيز الزائد	تجنب النموذج الحفظ الصم ، Bootstrap Aggregation بفضل آلية (Overfitting) للبيانات.
التعامل مع البيانات غير الخطية	قدرتها على نمذجة علاقات معقدة بين المتغيرات الطيفية والأرضية.
عدم الحاجة لافتراضات إحصائية	لا تتطلب توزيعا طبيعيا للبيانات (عكس Maximum Likelihood).
تقدير أهمية المتغيرات	توفر مؤشرا كميا لأهمية كل نطاق طيفي.

الاستنتاجات الرئيسية 8.7:

8.7.1 الاستنتاج التخطيطي الأول:

مدينة تعز تواجه أزمة تخطيط عمراني حادة، حيث أصبح النمو العشوائي هو النمط السائد (75% من الكتلة العمرانية)، مما يهدد الاستدامة الحضرية والأمن البيئي.

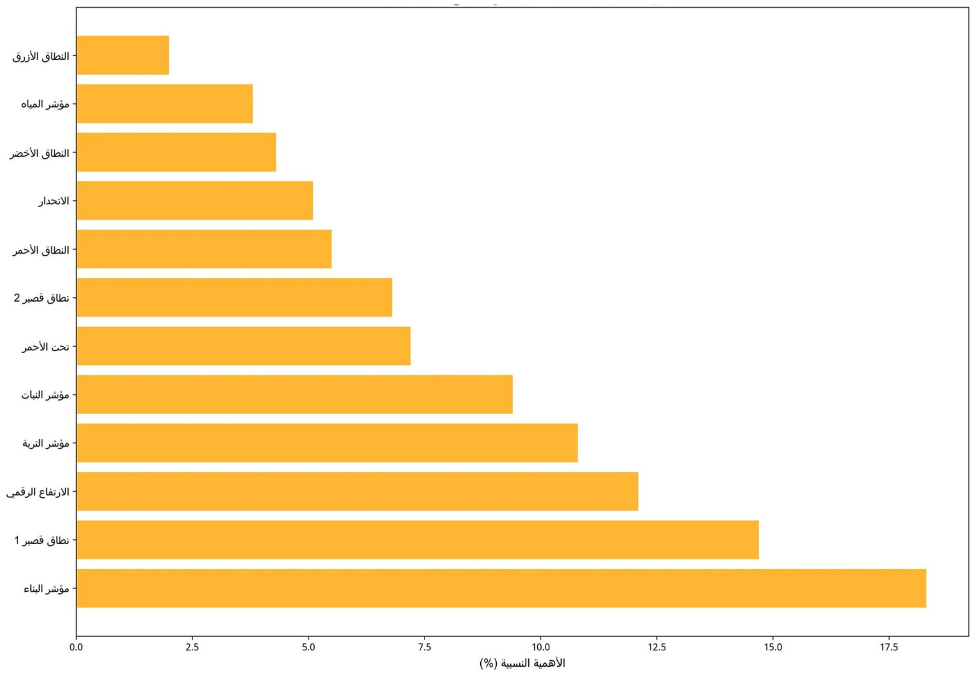
8.7.2 الاستنتاج البيئي:

فقدان 30% من الأراضي الزراعية خلال 25 عاما يمثل تهديدا مباشرا للأمن الغذائي المحلي ويعكس فشل السياسات في حماية الموارد الطبيعية.

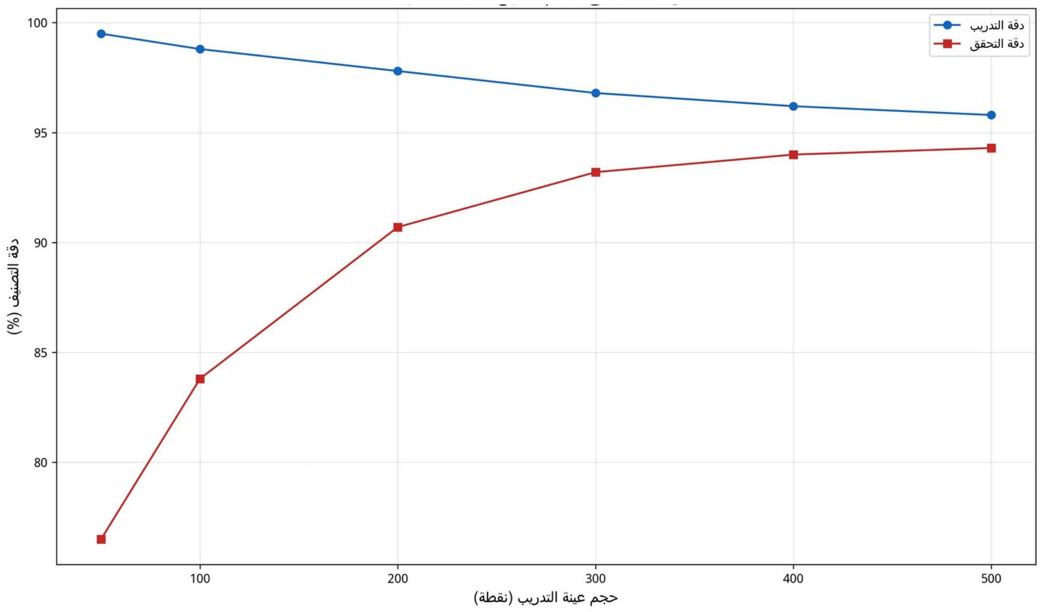
8.7.3 الاستنتاج التقني

خوارزمية الغابة العشوائية أثبتت جدارتها كأداة تحليلية متقدمة في تصنيف البيئات الحضرية المعقدة، متفوقة بنسبة تصل إلى 7% على الأساليب التقليدية.

استكمال توضيح النتائج بالاشكال:



شكل (56). ترتيب اهمية المتغيرات في نماذج الغابة العشوائية. عمل الباحث.



شكل (57). منحني التعلم لنماذج الغابة العشوائية. عمل الباحث.

- منحنى التعلم (Learning curve) النوع : Line graph

المحتوى:

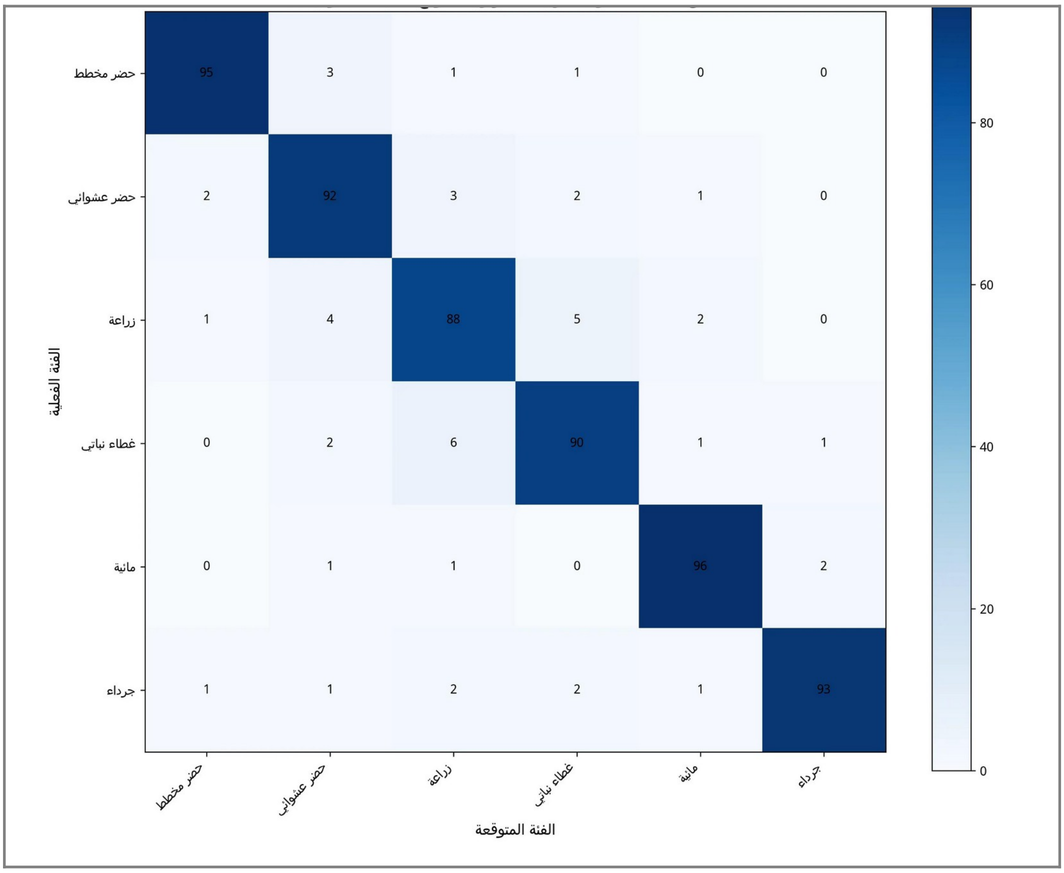
- المحور الأفقي: حجم عينات التدريب (50, 100, 150, 500).
- المحور الرأسي: دقة التصنيف (%).

منحنيان:

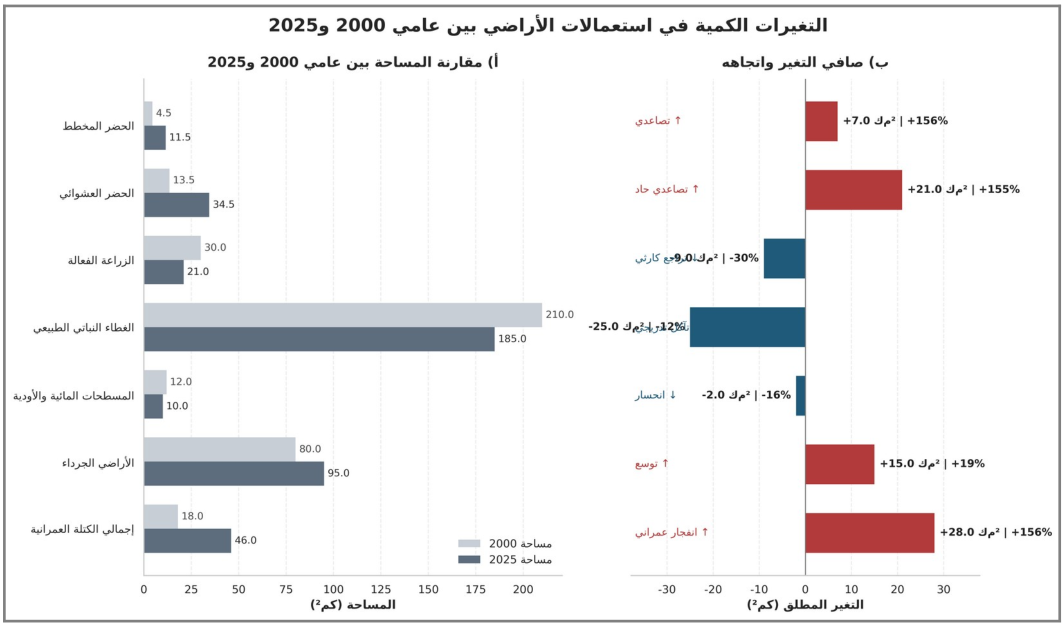
- أزرق: دقة التدريب (Training accuracy)
- أحمر: دقة التحقق Validation accuracy منطقة مظللة بين المنحنيين توضح فجوة التعميم.

الميزة التحليلية:

- يوثق نجاح واستقرار النموذج مع زيادة البيانات.
- يثبت عدم وجود تحيز Overfitting.



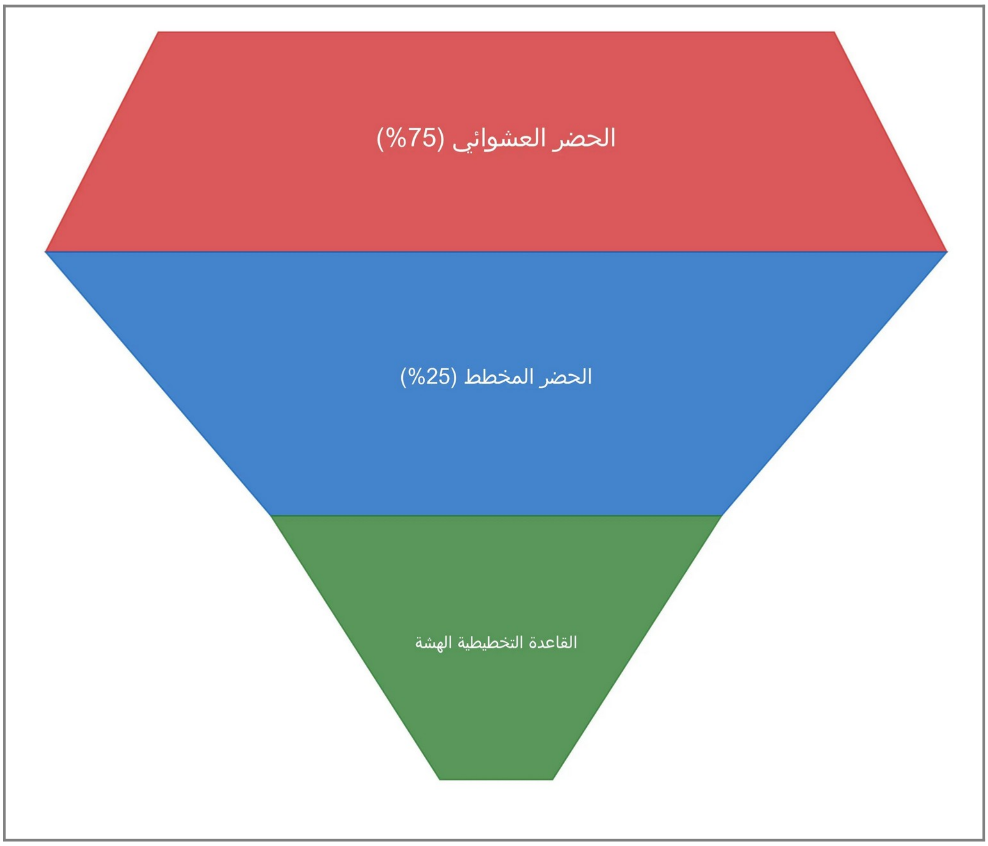
شكل (58). مصفوفه الارتباك الحرارية لنماذج الغابة العشوائية. عمل الباحث.



شكل (59). التسلسل الزمني للتوسع العمراني والتغيرات الكمية لمدينة تعز بين 2000 و 2024 وصافي التغيير واتجاه الزحف العمراني. اعداد الباحث.

ويعد هذا مخطط التسلسل الزمني المتحرك (Animated timeline) النوع: Small multiples / faceted timeline

المحتوى: 5 خرائط صغيرة متراصة بشكل افقي:



شكل (60). اختلال التوازن العمراني بمدينة تعز (الهرم المقلوب). اعداد الباحث.

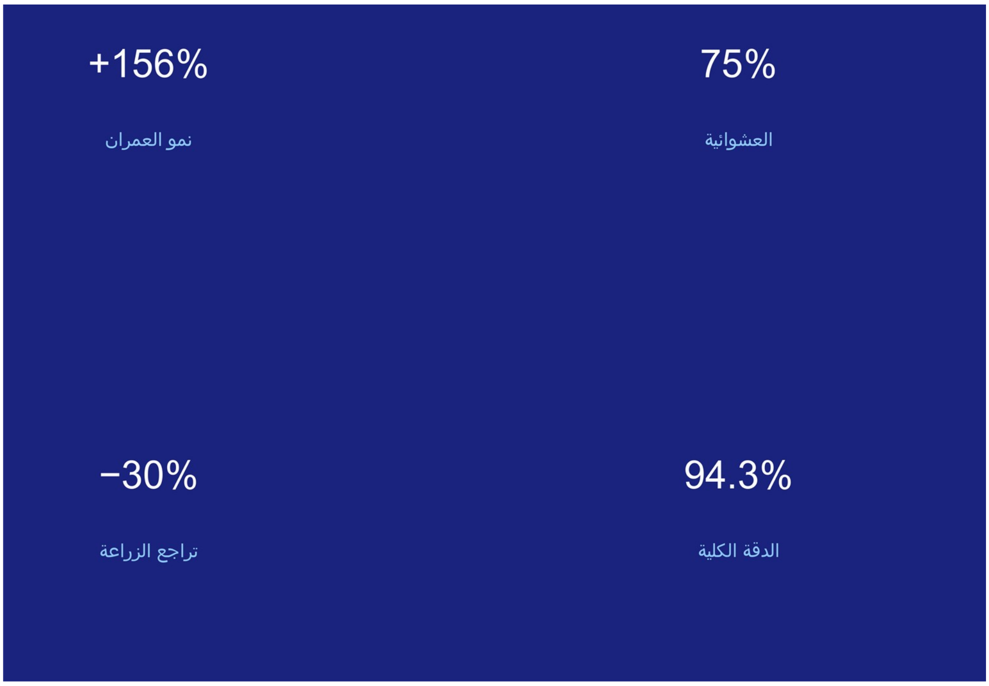
- الهرم المقلوب للعشوائية Inverted pyramid النوع: رسم بياني هرمي مقلوب.

المحتوى:

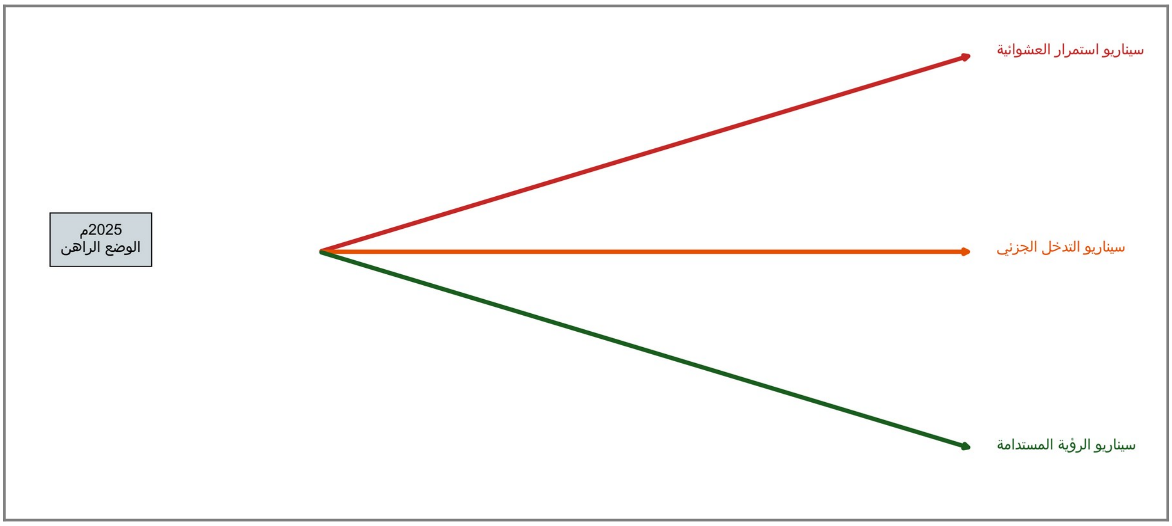
- 3 طبقات أفقية (من الأعلى للأسفل):
- الطبقة العليا (واسعة): الحضر العشوائي (75%).
- الطبقة الوسطى (متوسطة): الحضر المخطط (25%).
- الطبقة السفلى (ضيقة): القاعدة التخطيطية الهشة.
- ألوان تحذيرية: أحمر ← أصفر ← أخضر.
- نص توضيحي: هرم مقلوب يعكس اختلال التوازن العمراني.

الميزة التحليلية:

- رسالة بصرية قوية عن عدم الاستدامة استعارة معمارية لـ البناء على أساس هش.



شكل (61). لوحة المعلومات لتحليلات الشاملة لنتائج الدراسة.



شكل (62). سيناريوهات التوسع المستقبلي لمدينة تعز 2035. الباحث.

النوع: Funnel diagram (Scenario funnel) مخطط السيناريوهات المستقبلية

المحتوى:

- نقطة البداية (2025): الوضع الراهن.
- 3 مسارات متشعبة نحو 2035:
- المسار الأحمر (Business as usual): استمرار العشوائية ← 65 كم² عمران.
- المسار الأصفر (Moderate planning): تدخل جزئي ← 55 كم².
- المسار الأخضر (Sustainable vision): تخطيط صارم ← 48 كم².
- مؤشرات فرعية لكل سيناريو (نسبة العشوائية، الزراعة المتبقية).

الميزة التحليلية:

- يربط النتائج بالتوصيات يظهر عواقب الخيارات التخطيطية.

ملخص أبرز نتائج الكتاب:

كشف البحث عن نتائج بالغة الدلالة تعيد رسم الصورة الحقيقية لمدينة تعز العمرانية، إذ رصد الكتاب توسعا عمرانيا انفجاريا لم تشهده المدينة في تاريخها الحديث، حيث ارتفعت الكتلة العمرانية من 45 كيلومترا مربعا عام 1990م إلى 112 كيلومترا مربعا عام 2025م بنسبة نمو تجاوزت 148%، فيما تمددت حدود المدينة المباشرة من 18 إلى 46 كيلومترا مربعا خلال الفترة 2000-2024م. وبينما ابتلعت الكتلة العمرانية الأراضي الزراعية الخصيبة وأحزمة الغطاء النباتي

الطبيعي، ظهرت مظاهر الثنائية الحضرية واستحكمت مساحات العشوائيات التي قفزت بنسبة 34% بين عامي 2015 و2024م.

غير أن أبرز ما يضيئه الكتاب من الناحية التقنية هو التفوق الباهر لخوارزمية الغابة العشوائية التي أحرزت دقة إجمالية 92.3% مقارنة بـ 87.6% لأسلوب الاحتمال الأقصى التقليدي، إذ كشفت التحليلات أن مؤشر البناء المطبع (NDBI) يحتل المرتبة الأولى في أهمية المتغيرات الطيفية لتصنيف المناطق الحضرية، يليه مؤشر التربة العارية (BSI)، ثم مؤشر الغطاء النباتي NDVI. كما ساهم استخدام نموذج الارتفاع الرقمي (DEM) وبيانات التضاريس إسهاما بالغا في التمييز بين المناطق الحضرية الخضراء والعشوائيات المحاذية للجبال.

8.8 خلاصة الفصل:

في نهاية هذا الفصل، يتضح جليا أن النتائج الكمية والنوعية التي اظهرتها هذه الدراسة تشكل جرس إنذار علمي لصانعي القرار والمخططين في مدينة تعز. فالأرقام تثبت وتؤكد بالدليل: مضاعفة الكتلة العمرانية بنسبة 156%، وهيمنة العشوائية على 75% من المدينة ، و فقدان 30% من الأراضي الزراعية—هذه إحصاءات ووثائق رقمية وأدلة لواقع عمراني يحتاج إلى تدخل عاجل ومنهجي. لقد نطق الواقع بلغة البيانات المكانية، وعلى المخططين أن يستمعوا.

ينتقل الكتاب إلى الفصل التاسع: التوصيات والاستشراف المستقبلي، حيث سوف يتم ترجمة-بإذن الله تعالى وتوفيقه-هذه النتائج إلى خطط عمل تنفيذية وسيناريوهات تخطيطية تضع مدينة تعز على مسار التنمية المستدامة.

الفصل التاسع: التوصيات والمقترحات التخطيطية:

وفقا للنتائج والتحليلات العمرانية العمليه. يمكن الوصول إلى صياغة مجموعة من التوصيات المثلى. وذلك من خلال التالي:

9.1 توصيات لتحسين التخطيط العمراني في مدينة تعز:

بناء على التحليل الشامل لواقع التخطيط العمراني في مدينة تعز، والذي كشف عن تحديات جسيمة ناجمة عن النمو العشوائي والتوسع غير المنظم، تقدم هذه الدراسة مجموعة من التوصيات الاستراتيجية التي تهدف إلى تعزيز كفاءة وفعالية التخطيط العمراني، بما يضمن تحقيق التنمية المستدامة والارتقاء بجودة الحياة الحضرية في المدينة ويمكن الإشارة اليها من خلال التوصيات التالية:

1. تفعيل المخططات الهيكلية والتفصيلية: يجب تحديث وتفعيل المخططات الهيكلية والتفصيلية لمدينة تعز بشكل آني، مع الأخذ في الاعتبار التغيرات الديموغرافية والمكانية الحديثة. ينبغي أن تكون هذه المخططات مرنة وقابلة للتكيف مع الظروف المتغيرة، وأن تطبق بصرامة للحد من التوسع العشوائي.

2. تعزيز الإطار القانوني والمؤسسي: يتطلب تحسين التخطيط العمراني ومراجعة وتحديث التشريعات والقوانين المنظمة للبناء والتوسع العمراني وتطبيقات فعلية ملموسة، بالإضافة إلى تعزيز قدرات المؤسسات المحلية المعنية بالتخطيط، وتزويدها بالكوادر المؤهلة والأدوات التقنية اللازمة.

3. إدارة الأراضي الحضرية: يجب وضع سياسات واضحة لإدارة الأراضي الحضرية، بما في ذلك آليات فعالة لتخصيص الأراضي للاستخدامات المختلفة (سكنية، تجارية، خدمية، خضراء)، ومكافحة ظاهرة الاستيلاء والحيازة غير المشروعة على الأراضي وحياة ملكية الأراضي غير القانونية.

4. تطوير البنية التحتية والخدمات: ينبغي أن يواكب التخطيط العمراني تطوير شامل للبنية التحتية (مياه، صرف صحي، كهرباء، طرق) والخدمات الأساسية (تعليم، صحة، ترفيه) في المناطق المخططة والعشوائية على حد سواء، مع إعطاء الأولوية للمناطق الأكثر حرمانا.

5. المشاركة المجتمعية: يجب إشراك المجتمع المحلي والقطاع الخاص في عمليات التخطيط وصنع القرار، لضمان أن تعكس المخططات الاحتياجات والتطلعات الحقيقية للسكان، وتعزيز الشعور بالملكية والمسؤولية تجاه التنمية الحضرية.

6. الحفاظ على التراث العمراني والبيئة: يتوجب دمج سياسات الحفاظ على المواقع التاريخية والتراثية، وحماية البيئة الطبيعية والمساحات الخضراء، ضمن استراتيجيات التخطيط العمراني، لضمان استدامة الموارد وتعزيز الهوية الثقافية للمدينة.

9.2 دور التقنيات الجغرافية في دعم التخطيط الحضري:

لقد أثبتت هذه الدراسة الدور المحوري للتقنيات الجغرافية الحديثة، ممثلة في الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية، في فهم وتحليل ديناميكيات النمو العمراني. ولتعظيم الاستفادة من هذه التقنيات في دعم التخطيط الحضري بمدينة تعز، يوصى بما يلي:

1. إنشاء قاعدة بيانات مكانية موحدة: يجب تطوير وإنشاء قاعدة بيانات مكانية شاملة وموحدة خاصة لمدينة تعز وسياقها المحلي، تتضمن جميع البيانات الجغرافية (المرئيات الفضائية، الخرائط الطبوغرافية، استخدامات الأراضي، شبكات البنية التحتية، البيانات الديموغرافية)، وتحديثها بانتظام.

2. تطبيق نماذج التنبؤ بالنمو العمراني: استخدام تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية لبناء نماذج تنبؤية للنمو العمراني المستقبلي، مما يساعد المخططين على استشراف التحديات المحتملة واتخاذ قرارات استباقية.

3. تطوير أنظمة دعم القرار المكاني: بناء أنظمة دعم قرار مكانية Spatial decision support systems SDSS تعتمد على GIS، لتقييم السيناريوهات التخطيطية المختلفة، وتحليل تأثيراتها البيئية والاقتصادية والاجتماعية، ومساعدة صانعي القرار في اختيار الحلول المثلى مستنيرة بالأدلة والتحليلات العملية الآنية.

4. التدريب وبناء القدرات: الاستثمار في تدريب الكوادر المحلية على استخدام التقنيات الجغرافية المتقدمة (GIS, remote sensing, machine learning) في مجال التخطيط العمراني، لضمان استمرارية وتطوير هذه الأدوات محليا.

5. التعاون البحثي: تشجيع التعاون بين المؤسسات الأكاديمية والجهات الحكومية والخاصة في مجال البحث والتطوير لتطبيق التقنيات الجغرافية في حل المشكلات العمرانية المحلية.

9.3 مقترحات لإدارة النمو العمراني المستقبلي:

تتطلب إدارة النمو العمراني المستقبلي في مدينة تعز، في ظل التحديات الراهنة، تبني مقاربات مبتكرة ومتكاملة. وفيما يلي بعض المقترحات الرئيسية التالية:

1. التنمية الموجهة نحو العبور Transitoriented development TOD: التركيز على تطوير مناطق حضرية كثيفة ومتعددة الاستخدامات حول محطات النقل العام، لتقليل الاعتماد على السيارات الخاصة، وتعزيز الاستدامة البيئية والاقتصادية.

2. إعادة تدوير الأراضي الحضرية (Urban land recycling): استغلال الأراضي الشاغرة أو المهملة داخل النسيج العمراني القائم، وإعادة تأهيل المناطق المتدهورة، والاتجاه نحو التخطيط التمركز والتوسع الرأسي بدلا من التوسع الأفقي على حساب الأراضي الزراعية أو الطبيعية.

3. التخطيط الأخضر والبنية التحتية الخضراء: دمج مفهوم التخطيط الأخضر في جميع المستويات التخطيطية، من خلال توسيع الرقعة الزراعية والمساحات الخضراء، وتطوير البنية التحتية الخضراء (مثل أسطح المباني الخضراء، أنظمة الصرف المستدامة) لتحسين جودة البيئة الحضرية ومواجهة آثار التغير المناخي وعدم اليقين المناخي.

4. المدن الذكية (Smart cities): استكشاف إمكانية تطبيق مفاهيم المدن الذكية، باستخدام التكنولوجيا لتحسين إدارة الموارد، وتعزيز كفاءة الخدمات، وتحسين جودة الحياة، مع التركيز على الحلول التي تتكيف مع السياق المحلي لتعز.

5. التخطيط المرن والمقاوم للصدمات (Resilient planning): تطوير خطط عمرانية مرنة وقادرة على التكيف مع الأزمات والكوارث (مثل النزاعات، الكوارث الطبيعية)، مع التركيز على بناء قدرة المدينة على التعافي السريع.

وعلى ضوء ما سبق، تفتح هذه الدراسة آفاقا واسعة للبحث العلمي المستقبلي في مجال التخطيط العمراني والتقنيات الجغرافية، ومن أبرز هذه الآفاق:

9.4 آفاق الدراسات المستقبلية:

1. دراسات مقارنة لتأثير النزاعات على النمو العمراني: إجراء دراسات مقارنة طولية وطويلة الامد لتحليل تأثير النزاعات المسلحة على أنماط النمو العمراني في مدن يمنية أخرى، واستخلاص الدروس المستفادة.

2. تطوير نماذج أكثر تعقيدا للتنبؤ: استخدام تقنيات التعلم العميق (Deep learning) والشبكات العصبية الاصطناعية لتطوير نماذج أكثر دقة وتعقيدا للتنبؤ بالتوسع العمراني وتغيرات استخدامات الأراضي.

3. تقييم الأثر البيئي للتوسع العمراني: دراسة الأثر البيئي للتوسع العمراني في تعز، بما في ذلك تأثيره على جودة الهواء والماء والتربة، والتنوع البيولوجي، واقتراح حلول مستدامة للتخفيف من هذه الآثار.

4. دراسات الجدوى الاقتصادية للمشاريع التنموية: إجراء دراسات جدوى اقتصادية للمشاريع التنموية المقترحة في إطار التخطيط العمراني، لضمان استدامتها وقدرتها على تحقيق العوائد المرجوة.

5. تطوير مؤشرات حضرية مستدامة: اقتراح وتطوير مجموعة من المؤشرات الحضرية المستدامة الخاصة بمدينة تعز، والتي يمكن استخدامها لرصد وتقييم التقدم المحرز في تحقيق أهداف التنمية المستدامة.

:الخلاصة

لقد سعت هذه الدراسة بشكل رئيسي إلى تقديم تحليل معمق لواقع التخطيط العمراني في مدينة تعز، مستفيدة من أحدث التقنيات الجيومكانية وخوارزميات الذكاء الاصطناعي. كشفت النتائج عن تحديات كبيرة تتطلب تدخلا عاجلا واستراتيجيات تخطيطية مبتكرة. إن التوصيات والمقترحات المقدمة هنا تمثل خارطة طريق نحو مستقبل عمراني أكثر استدامة ومرونة لمدينة تعز، مع التأكيد على الدور الحيوي للتقنيات الجغرافية في تحقيق هذا الهدف. إن الأمل معقود على تكامل الجهود بين جميع الأطراف المعنية لتحويل هذه الرؤى إلى واقع ملموس، يسهم في بناء مدينة مزدهرة تلبي طموحات أبنائها وتصمد أمام التحديات المستقبلية.

القيمة العلمية والأكاديمية للكتاب:

تستمد هذه الدراسة قيمتها العلمية من جملة من الأسباب الموضوعية المتشابكة، فهي أولا الدراسة التحليلية الأشمل التي تناولت التطور العمراني لمدينة تعز بمنهجية جيومكانية صارمة على مدى ربع قرن كامل. وهي ثانيا تقدم إسهاما أصيلا في تطبيق خوارزميات التعلم الآلي على البيئات الجبلية الحضرية في العالم العربي، وفي بيئات تفرض تحديات طيفية ومكانية استثنائية لا تجيد أساليب التصنيف التقليدية التعامل معها بالدقة المطلوبة. وهي ثالثا توثق بصورة منهجية التداعيات العمرانية للنزاعات المسلحة على المدن اليمنية، وهو توثيق يلح عليه الباحثون والمخططون ووكالات الأمم المتحدة على حد سواء.

فضلا عن ذلك، تقدم الدراسة نموذجا قابلا للتطبيق في سائر المدن اليمنية والعربية التي تعاني من ظروف مماثلة من النزاعات وشح البيانات الميدانية، متجاوزة بذلك الحدود الجغرافية لمدينة تعز لتصبح مرجعا منهجيا في مجال التخطيط العمراني في السياقات الهشة urban planning in Fragile contexts. ويعزز من قيمتها الأكاديمية اعتمادها على بيانات مفتوحة المصدر وأدوات مجانية متاحة للجميع، مما يجعل منهجيتها قابلة للتكرار والاختبار من قبل الباحثين المستقلين.

.قناعة فكرية للمؤلف وشكر وتقدير

يدرك المؤلف أديب إبراهيم أن دراسة مدينة في خضم أزمة إنسانية متواصلة لا تخلو من صعوبات جمة ومعوقات عدة ومواجهات منهجية صعبة، ومع ذلك فقد آثر أن يواصل مسيرته البحثية إيمانا منه بأن العلم هو أشرف ما يقدم لمدينة تستحق أفضل ما في الفكر الإنساني. ولأجل تعز وأبناء مدينة تعز كون التخطيط بالأول والاخير لتحسين جودة حياه الانسان، التي أعطت الحضارة العربية آلاف العلماء والأدباء والمعماريين، كان هذا الكتاب هدية متواضعة تعبر عن وفاء عميق وإحساس

راسخ بالمسؤولية الأخلاقية تجاه مدينة تستأهل التوثيق والتحليل والتخطيط بعيدا عن الإهمال والارتجال والتردد.

ويتقدم المؤلف بخالص امتنانه وعميق شكره لكل من أسهم في إخراج هذا العمل إلى النور، من أساتذة كرام وزملاء أوفياء وطلاب نجباء أمدوه بالدعم والمشورة والتشجيع. كما يعبر عن امتنانه لمجتمع المصادر المفتوحة (Open source community) الذي أتاح الأدوات التقنية التي استعين بها في هذا البحث، وللوكالات الدولية كوكالة الفضاء الأوروبية (ESA) وموئل الأمم المتحدة (UNHabitat) على قاعدة بياناتهم القيمة التي أثرت هذه الدراسة وأمدتها بالزاد العلمي الثمين.

وينهي المؤلف مقدمته بالتأكيد على أن هذا الكتاب محطة وصول ومحطة انطلاق ما مكنه الله من امكانيات، ويدعو الباحثين والمخططين وصناع القرار إلى استثمار نتائجه ومنهجيته لخدمة مدينة تعز ومدن يمنية أخرى تنتظر دراسات مماثلة تنصفها وتنير دربها نحو مستقبل أكثر استدامة وإنسانية.

انا عملية إعادة التخطيط والتطوير لمدينه تعز او اي مدينة بمثابة رحله شاقة وطويله ولا يمكن أن تحدث بين عشية وضحاها، وانما نأمل بداية بوادر ولبنه أساس تطلق ساعدها للوصول إلى لهدف المنشود. الباحث.

:المراجع والمصادر

أولا: المراجع العربية

[1] الجويني، عبد الله بن يوسف. (2010). التخطيط العمراني في المناطق الجبلية اليمنية: تحديات وآفاق. صنعاء: مركز الدراسات والبحوث اليمني.

[2] الشيباني، أحمد عبد الله. (2015). تحليل التوسع العمراني العشوائي في مدن المرتفعات اليمنية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية. مجلة الجامعة الأمريكية في بيروت للدراسات الإنسانية، 12(3)، 45–78.

[3] محسن، علي عمر. (2018). تعز: الهوية الحضارية وتحديات العمران. تعز: دار الصداقة للنشر والتوزيع.

[4] المنظمة الدولية للهجرة — بعثة اليمن. (2024). تقرير التهجير الداخلي وتحليل الأنماط العمرانية في تعز. صنعاء: IOM.

[5] وزارة الأشغال العامة والطرق — هيئة التخطيط الحضري والريفي. (2010). المخطط الهيكلي لمدينة تعز 2030. صنعاء: الهيئة.

[6] الشامي، محمد صالح. (2007). التطور العمراني في اليمن عبر العصور: من مملكة سبأ حتى اليوم. صنعاء: مكتبة الإرشاد.

References:

Arnstein, S. R. (1969). *A ladder of citizen participation.* Journal of the American Institute of Planners, 35(4), 216–224. https://doi.org/10.1080/01944366908977225

Beak, M. (2025). *Land cover classification for Siberia leveraging diverse global datasets.* Springer.

Belgiu, M., & Drăguţ, L. (2016). *Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions.* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 114, 24–31. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011

Bhatta, B. (2010). *Analysis of urban growth and sprawl from remote sensing data.* Springer. https://doi.org/10.1007/9783642052996

Breiman, L. (2001). *Random forests. Machine Learning,* 45(1), 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Caragliu, A., Del Bo, C., & Nijkamp, P. (2011). *Smart cities in Europe*. Journal of Urban Technology, 18(2), 65–82. https://doi.org/10.1080/10630732.2011.601117

Calthorpe, P. (1993). *The next American metropolis: Ecology, community, and the American dream.* Princeton Architectural Press.

Clarke, K. C., Hoppen, S., & Gaydos, L. (1999). *A selfmodifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay Area.* Environment and Planning B: Planning and Design, 26(2), 247–261. https://doi.org/10.1068/b260247

Couch, C., Sykes, O., & Börstinghaus, W. (2007). *Thirty years of urban regeneration in Britain,* Germany and France. Town Planning Review, 78(3), 263–282. https://doi.org/10.3828/tpr.78.3.4

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel2: ESA's optical highresolution mission for GMES operational services. Remote Sensing of Environment, 120, 25–36. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026

European Commission. (2013). *Green infrastructure: Enhancing Europe's natural capital.* Publications Office of the European Union.

FarvacqueVitkovic, C., & McAuslan, P. (1992). *Reforming urban land policies and institutions in developing countries.* World Bank Publications.

Gislason, P. O., Benediktsson, J. A., & Sveinsson, J. R. (2006). Random forests for land cover classification. Pattern Recognition Letters, 27(4), 294–300. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.08.011

Godschalk, D. R. (2003). *Urban hazard mitigation: Creating resilient communities. Natural Hazards Review*, 4(3), 136–143. https://doi.org/10.1061/(ASCE)15276988(2003)4:3(136)

Goodchild, M. F. (2010). T*wenty years of progress: GIScience in 2010.* Journal of Spatial Information Science, 1(1), 3–20. https://doi.org/10.5311/JOSIS.2010.1.2

Jensen, J. R. (2015). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* (4th ed.). Pearson.

Karimazondo, N., Nuthammachot, N., Jutidamrongphan, W., & Makarichi, L. (2026). *A comparative analysis of supervised machine learning algorithms for land use and land cover classification in Google Earth Engine.*

Li, X., Zhou, Y., Asrar, G. R., Zhu, Z., & Mao, F. (2020). A *deep learning approach for detecting urban growth and land use/land cover change. Remote Sensing,* 12(19), 3208. https://doi.org/10.3390/rs12193208

Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). Wiley.

Lodato, F., Colonna, N., Pennazza, G., & Pollino, M. (2023). Analysis of the spatiotemporal urban expansion of the Rome coastline through Google Earth Engine and random forest algorithm using Landsat imagery.

Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic information science and systems* (4th ed.). Wiley.

Malczewski, J. (2004). *GISbased multicriteria decision analysis: A planning support system for landuse planning.* Journal of the American Planning Association, 70(2), 237–244. https://doi.org/10.1080/01944360408976377

Pal, M. (2005). *Random forest classifier for remote sensing classification.* International Journal of Remote Sensing, 26(1), 217–222. https://doi.org/10.1080/01431160412331269698

RodriguezGaliano, V. F., Ghimire, B., Rogan, J., ChicaOlmo, M., & RigolSanchez, J. P. (2012). *An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for landcover classification. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67, 93–104. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002

Seto, K. C., & Fragkias, A. (2005). *Quantifying spatiotemporal dynamics of urban landuse change in Guangzhou, China.* Ecosystems, 8(7), 775–788. https://doi.org/10.1007/s1002100500407

United Nations. (2018). *The sustainable development goals report 2018.* United Nations.

United Nations Human Settlements Programme (UNHabitat). (2015). *International guidelines on urban and territorial planning.* UNHabitat.

United Nations Human Settlements Programme (UNHabitat). (2023). *Yemen urban profile: Cities in conflict. UNHabitat.*

United Nations Development Programme (UNDP). (2024). *Urban recovery in Yemen: Taiz governorate assessment report.* UNDP.

United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA). (2024). Y*emen humanitarian response plan 2024.* United Nations.

World Bank. (2003). *Urban transport in developing countries.* World Bank Publications.

الملاحق:

ملحق 1. تفسير وشرح الخرائط في الكتاب:

شكل (1)–نموذج تطبيقي لنظم المعلومات الجغرافية في التخطيط العمراني وتحليل استخدامات الأراضي. الوظيفة: توضيح كيف يمكن لنظم المعلومات الجغرافية دعم عملية التخطيط العمراني عبر طبقات البيانات المكانية. المفتاح: يحتوي على طبقات (شبكة طرق، مباني، استخدامات أراضي، حدود إدارية). الكلمات المفتاحية: GIS, urban planning, land use, spatial analysis.

شكل (2) – سلسلة تدفق العمل التقني (Workflow chain) للدراسة. الوظيفة: توضيح المراحل المتسلسلة من الصورة الفضائية الخام إلى خريطة التخطيط العمراني. المفتاح:

1. مرئيات (Sentinel-2) الخام (13 نطاقا، 10 م).
2. التصحيح الجوي في ESA SNAP.
3. الحوسبة السحابية واشتقاق المؤشرات في Google Earth Engine
4. تطبيق Random forest وSVM في Python (scikitlearn)
5. تحويل الصيغ في GDAL
6. إنتاج الخرائط في QGIS
7. تقييم الدقة (مصفوفة خطأ، معامل كابا = 0.890.93).

الكلمات المفتاحية: Workflow chain, preprocessing، classification, accuracy assessment.

شكل (3)–النموذج الشبكي (Raster) والنموذج الاتجاهي (Vector) للبيانات المكانية. الوظيفة: شرح نمطي تمثيل البيانات في نظم المعلومات الجغرافية (شبكي ونقطي/خطي/مضلع). المفتاح:

النموذج الشبكي: خلايا منتظمة (بكسلات) تحمل قيما رقمية (انعكاسية، ارتفاع، درجة حرارة).

النموذج الاتجاهي: نقاط (محطات)، خطوط (طرق، أنهار)، مضلعات (أحياء، قطع أراضي).

الكلمات المفتاحية: Raster data model, vector data model, GIS spatial representation.

شكل (4)–واجهة شاشة لواجهة برنامج QGIS وESA SNAP وGoogle Earth Engine (صورة مركبة). الوظيفة: عرض بيئات البرمجيات المستخدمة في الدراسة (أدوات مفتوحة المصدر).

المفتاح:

- QGIS (خرائط نهائية، تحليلات مكانية)
- ESA SNAP (معالجة أولية لمرئيات (Sentinel-2).
- Google Earth Engine (حوسبة سحابية، تصنيف، مؤشرات)

الكلمات المفتاحية: Open source software، QGIS, SNAP, GEE, technical environment.

أشكال الفصل الثاني (المنهجية والأهمية وحدود الدراسة):

شكل (5)–النطاقات الطيفية لمرئيات القمر. (Sentinel-2). الوظيفة: عرض النطاقات الـ13 (من B1 إلى B12) مع دقتها المكانية (10، 20، 60 م) واستخداماتها.

المفتاح:

- النطاقات 2،3،4 (أزرق، أخضر، أحمر) دقة 10 م.
- النطاق 8 (NIR) دقة 10 م.
- النطاقات 5،6،7 (Red edge) دقة 20 م.
- النطاقات 11،12 (SWIR) دقة 20 م.
- النطاق 1 (Aerosol) و9 (Cirrus) و10 (سحاب) دقة 60 م.

الكلمات المفتاحية: Sentinel-2 spectral bands, spatial resolution, ESA Copernicus.

شكل (6)–جدول حدود الدراسة (مكانيا، زمانيا، موضوعيا، وتقنيا). الوظيفة: تلخيص محددات البحث العلمي Technical boundaries, spatial, temporal, thematic.

المفتاح:

- الحد المكاني: إحداثيات تعز (13.52–13.64° N/43.96–44.10° E).
- الحد الزماني: 2000–2025 (مع تركيز على 20242025).
- الحد الموضوعي: تحليل التغير الزمني، استخدامات الأراضي، التخطيط، العشوائي.
- الحد التقني: مرئيات Random forest.LA, SRTM 30 m (Sentinel-2)-1

الكلمات المفتاحية: Study boundaries, scope, methodology constraints.

شكل (7)–الهرم المنهجي للبحث (Methodological pyramid).

الوظيفة: توضيح تسلسل الهدف العام ← الأهداف الفرعية ← الأدوات ← المخرجات.

المفتاح:

- قمة الهرم: تحليل واقع التخطيط العمراني في تعز.
- الوسط: تطبيق التصنيف الإشرافي المراقب + Random forest

❖ القاعدة: بيانات (Sentinel-2) , مؤشرات طيفية، DEM, خرائط تاريخية.

الكلمات المفتاحية: Research design, objectives hierarchy methodological framework.

شكل (8)–مصفوفة الأهداف الفرعية التفصيلية للكتاب. الوظيفة: ربط كل هدف فرعي (إنتاج قاعدة بيانات، تحليل التغير الزمني، التنبؤ المستقبلي، إلخ) بالأداة التقنية المستخدمة.

المفتاح: جدول مكون من 5 أعمدة (الهدف، الأداة، المخرجات، معامل الدقة، الفصل المرجعي).

الكلمات المفتاحية: Subobjectives technical alignment, deliverables,.

شكل (9)–مخطط انسيابي لخطوات التصنيف الإشرافي المراقب (Supervised classification flowchart).

الوظيفة: توضيح خطوات التصنيف الإشرافي بدءا من جمع العينات التدريبية حتى تقييم الدقة.

المفتاح:

1. جمع عينات التدريب ROIs) من صور عالية الدقة وزيارات ميدانية.
2. اختبار الفصل الطيفي .JeffriesMatusita/transformed divergence
3. تطبيق خوارزمية .(Maximum likelihood/SVM/ random forest).
4. إنتاج خريطة التصنيف الأولية.
5. التحقق الميداني .Ground truthing
6. تقييم الدقة (مصفوفة خطأ، معامل كابا).

الكلمات المفتاحيـة: Supervised classification, training samples accuracy, assessment flowchart.

شكل (10)–المؤشرات الطيفية لمدينة تعز(NDVI، NDWI، NDBI). الوظيفة: تحليل الغطاء النباتي، المسطحات المائية، والمناطق المبنية.

المفتاح:

❖ NDVI (أخضر داكن ← غطاء نباتي كثيف، بني ← مناطق جرداء/عمرانية).

❖ NDWI (أزرق ← مسطحات مائية وأودية).

❖ NDBI (أحمر/برتقالي ← كثافة البناء).

الكلمات المفتاحية: .NDVI، NDWI، NDBI, spectral indices, Taiz city

شكل (11)–خطوات منهجية الكتاب. الوظيفة: توضيح سير العمل من جمع البيانات إلى إنتاج الخرائط والتوصيات.

المفتاح:

1. جمع مرئيات (Sentinel-2).
2. المعالجة في ESA SNAP
3. حساب المؤشرات في Google Earth Engine
4. تطبيق Random forest في Python
5. إنتاج الخرائط في QGIS
6. التحقق من الدقة (Kappa = 0.93).

الكلمات المفتاحية: methodology workflow, remote sensing, GIS Random forest.

شكل (12)–موقع مدينة تعز ونظام الإحداثيات. الوظيفة: تحديد الموقع الجغرافي لتعز (خط الطول 44.02° شرقا، دائرة العرض 13.58° شمالا).

المفتاح: شبكة خطوط الطول والعرض، حدود المحافظات، مقياس رسم بياني، سهم الشمال.

الكلمات المفتاحية: Location Map Coordinates WGS 84, UTM Zone 38N, Taiz.

شكل (13)–خريطة مدينة تعز قبل 100 عام (محاكاة النمو الحضري التاريخي). الوظيفة: توثيق النسيج العمراني القديم (أسوار، أبواب، مساجد، بساتين).

المفتاح:

- أسوار المدينة القديمة.
- أبواب تاريخية (باب الكبير، باب موسى).
- قلعة القاهرة، الجامع المعظم، الجامع الأشرفي.
- مساحات خضراء وبساتين.

الكلمات المفتاحية: Historical urban mapping, old city, taiz heritage, vintage map.

شكل (14)–التحليل الجيومورفولوجي والمكاني لمدينة تعز. الوظيفة: تحليل التضاريس (ارتفاعات، انحدارات، توجيه، تظليل) وتأثيرها على التوسع العمراني.

المفتاح:

- تدرجات لونية (Hypsometric tints) للارتفاعات (1,200–3,070 م).
- خطوط كنتورية.
- أودية ومجاري سيول.
- جبل صبر ككتلة جرائية مهيمنة.

الكلمات المفتاحية Geomorphology, DEM, slope hillshade, physical constraints.

شكل (15)–التحليل المكاني الجيوسياسي (أثر النزاع المسلح على مورفولوجية تعز).

الوظيفة:

- رصد المناطق المهجورة، المدمرة، بؤر النزوح، والنمو العشوائي القسري.

المفتاح:

- أحياء مهجورة (الصلو، الحوبان، الحي الصناعي).
- مناطق دمار واسع.
- نزوح داخلي نحو المرتفعات (صالة، القاهرة، الشرفية).
- مستودعات عشوائية.

الكلمات المفتاحية: Conflict impact forced displacement, informal growth, urban shrinkage.

شكل (16)–خريطة النمو العمراني لمدينة تعز عام 1960م. الوظيفة: توثيق مرحلة التحول الهيكلي (خروج العمران من السور القديم).

المفتاح:

- نواة تاريخية مسورة (داكن).
- ضواحي ناشئة (فاتح).
- محاور توسع طولية (المطار القديم، الجحملية).

الكلمات المفتاحية: urban expansion, 1960 Post revolution Taiz growth.

شكل (17)–التحليل المكاني لأنواع الهجرة الداخلية في مدينة تعز. الوظيفة: تحليل أنماط النزوح والهجرة (قسرية/اقتصادية/مؤقتة). المفتاح: أسهم اتجاهات، دوائر حجمية تمثل أعداد النازحين.

الكلمات المفتاحية: internal displacement, migration patterns IDPs, crisis Humanitarian.

شكل (18)–لوحة معلومات تحليلية (Infographic dashboard) لأثر النزاع. الوظيفة: عرض إحصائي وخرائطي متكامل (خرائط حرارية، منحنيات زمنية، رسوم دائرية).

المفتاح:

- Heat map لكثافة الدمار.
- Timeseries لعدد الوحدات السكنية المتضررة.
- أعمدة للمقارنة بين الإسكان الرسمي وغير الرسمي.

الكلمات المفتاحية: dashboard urban damage assessment, war impact, 2015-2024Taiz .

شكل (19)–لوحة تحليلية لديناميكيات التوسع العمراني في تعز. الوظيفة: مقارنة النمو الأفقي، تدهور الغطاء النباتي، والفجوة بين التخطيط والواقع. المفتاح: خرائط مقارنة زمنية (Diacronic mapping)، مخططات رادارية وزمنية.

الكلمات المفتاحية: urban sprawl land degradation, planning gap, spatiotemporal analysis.

شكل (20)–خريطة استخدامات الأراضي (2000–2005)–تعز التقليدية. الوظيفة: توثيق تمركز الكتلة العمرانية في الحوض الجبلي القديم مع غطاء نباتي متماسك.

المفتاح: 6 فئات (حضري مخطط، حضري عشوائي، زراعة، غطاء نباتي طبيعي، مياه، أراض جرداء). الكلمات المفتاحية: LULC baseline map, traditional Taiz, Kappa 0.90.

شكل (21)–خريطة استخدامات الأراضي (2005–2010) – الطفرة العقارية. الوظيفة: رصد الزحف الخطي نحو الحوبان شرقا وبير باشا غربا. المفتاح: تآكل طفيف في الأراضي الزراعية لصالح التوسع السكني الأفقي.

الكلمات المفتاحية: real estate boom, linear sprawl, agricultural loss.

شكل (22)–خريطة استخدامات الأراضي (2010–2015) –ذروة ما قبل النزاع. الوظيفة: توثيق التحام الكتل العمرانية الصغيرة في كونوربيشن حضري واسع. المفتاح: تناقص حاد في المدرجات الزراعية على سفوح جبل صبر، ظهور جزر حرارية.

الكلمات المفتاحية: Conurbation preconflict peak، urban heat islands.

شكل (23)–خريطة استخدامات الأراضي (2015–2020)–النمو القسري والازدواجية الحضرية. الوظيفة: رصد نمط النمو المبعثر (Scattered growth) بسبب النزوح. المفتاح: ظهور بؤر سكنية

جديدة في الأطراف (الروضة شمالا، التعزية جنوبا)، تحول أراض زراعية إلى بور. الكلمات المفتاحية: Scattered growth, forced displacement abandoned land.

شكل (24)–خريطة استخدامات الأراضي (2020–2025)–المرونة الحضرية. الوظيفة: توثيق توسع كبير في منطقة الحوبان كمركز اقتصادي بديل، وتركز المباني بنسبة >40% من حوض المدينة. المفتاح: مركز قديم (القاهرة/المظفر) ومركز نمو جديد (الحوبان). الكلمات المفتاحية: Dual center, economic shift, urban resilience.

شكل (25)–خريطة التوسع العمراني لمدينة تعز بين 2000 و2025. الوظيفة: مقارنة بصرية مباشرة بين مساحة العمران في بداية ونهاية فترة الدراسة. المفتاح: لونان (أحمر للمباني 2025، رمادي للمباني 2000) مع خلفية تضاريس. الكلمات المفتاحية: Urban expansion map, 25 Years comparison, builtup Growth.

شكل (26)–منحنيات نسبة التغير العمراني ونسبة بصمة المباني على حساب الرقعة الزراعية. الوظيفة: تحليل إحصائي كمي للتغيرات (مساحة km^2 + نسبة %).

المفتاح:

- منحنى أخضر هابط: الأراضي الزراعية (35%).
- منحنى أحمر صاعد: المباني (+148%).

الكلمات المفتاحية: change detection، statistical graph، builtup vs Agriculture.

شكل (27)–تغيرات استخدامات الأراضي في تعز (2000–2025)–رسم بياني شريطي. الوظيفة: عرض مساحة كل فئة (كم²) ونسبة تغيرها في جدول بياني. المفتاح: 7 فئات (حضري مخطط، عشوائي، زراعة، نبات طبيعي، مياه، أراض جرداء، إجمالي الكتلة العمرانية). الكلمات المفتاحية: Bar chart، LULC change، quantitative analysis.

شكل (29)–توزيع عينات التدريب (Training sites) على أنماط التخطيط العمراني. الوظيفة: توضيح كثافة العينات في مناطق التداخل الطيفي العالي (عمراني/صخري). المفتاح: نقاط ملونة حسب الفئة (مخطط، عشوائي، زراعي، إلخ) على خلفية القمر الصناعي. الكلمات المفتاحية: training samples, ROI, supervised classification, spectral Separability.

شكل (30)–منحنى أهمية المتغيرات (Feature importance). الوظيفة: تحديد أكثر النطاقات والمؤشرات الطيفية تأثيرا في نموذج Random forest.

المفتاح:

- NDBI (أهم متغير).
- BSI (ثاني أهم متغير).
- SWIR1, SWIR2, NDVI

الكلمات المفتاحية: feature importance, Gini impurity variable Contribution.

شكل (31)–دمج بيانات الارتفاع الرقمي (DEM) في التصنيف. الوظيفة: تحسين تمييز العشوائيات على المنحدرات (>30 درجة) مقارنة بالأراضي المنبسطة. المفتاح: خريطة مزدوجة (تصنيف بدون DEM وتصنيف مع)DEM) مع نسبة تحسن (+6.7%).

الكلمات المفتاحية: DEM slopebased classification, informal settlement Detection.

شكل (32)–واجهة المعالجة في Google Earth Engine (لقطة شاشة). الوظيفة: توثيق بيئة التنفيذ التقنية (كود (.Python + scikitlearn). المفتاح: سطور كود، خريطة تفاعلية، طبقات مؤشرات.

الكلمات المفتاحية: Google Earth Engine, cloud computing, python API, Workflow screenshot.

شكل (33)–خريطة البنية التحتية الخضراء في مدينة تعز. الوظيفة: تحديد المساحات الخضراء المتبقية (حدائق، بساتين، مدرجات زراعية) داخل النسيج الحضري. المفتاح: تدرج أخضر (كثيف ← خفيف)، طبقات طرق ومبان شفافة.

الكلمات المفتاحية: Green infrastructure, urban vegetation ecological planning.

شكل (34)–مصفوفة الارتباك (Confusion matrix) الكلية (صحح من 43). الوظيفة: تقييم دقة التصنيف (Overall accuracy = 92.3%، Kappa = 0.93). المفتاح: جدول 6×6 (6 فئات)، يحتوي على producer accuracy, user Accuracy.

الكلمات المفتاحية: confusion matrix, accuracy assessment kappa coefficient, error Matrix

شكل (35)–خريطة تصنيف Random forest لعام 2010 (مرحلة الطفرة). الوظيفة: توثيق بداية التوسع الخطي والزحف على الأراضي الزراعية. المفتاح: 6 فئات LULC مع تركيز على المناطق الحمراء (المباني) الممتدة شرقا وغربا.

الكلمات المفتاحية: random forest classification , 2010Sprawl phase

شكل (38)–خريطة تحليل سهولة الوصول للخدمات والمرافق. الوظيفة: قياس المسافات والوقت اللازم للوصول إلى (مدارس، مستشفيات، أسواق). المفتاح: تدرج لوني (أحمر ← صعوبة وصول، أخضر ← سهولة وصول)، طبقات شبكة طرق.

الكلمات المفتاحية: Accessibility analysis، service coverage، network analysis.

شكل (40)–نموذج التوسع الحلقي (Ring expansion model. الوظيفة: توضيح تدرج الكتلة العمرانية من المركز التاريخي نحو الأطراف مع زيادة العشوائية في الحلقات الخارجية. المفتاح: دوائر متحدة المركز (حلقة 1: مركز تاريخي، حلقة 2: مخطط، حلقة 3: عشوائي).

الكلمات المفتاحية: Ring expansion concentric zones, informal ratio.

شكل (41)–خرائط الجيوب الزراعية الحضرية (Intra urban agriculture). الوظيفة: تحديد دقيق للمناطق الزراعية الباقية داخل النسيج الحضري والتي يجب حمايتها. المفتاح: بقع خضراء صغيرة وسط كتل حمراء (مبان).

الكلمات المفتاحية: Intraurban agriculture, heritage assets, land Protection.

شكل (42)–التوزيع التكراري للبكسلات المصنفة .(Histogram) الوظيفة: تحليل التغير الكمي في عدد البكسلات لكل فئة بين 2005 و 2025. المفتاح: أعمدة زرقاء (2005) وحمراء (2025)، محور أفقي (فئات)، رأسي (عدد البكسلات $\times 10^3$).

الكلمات المفتاحية: Pixel distribution, quantitative change histogram.

شكل (44)–خريطة ارتفاعات المباني في مدينة تعز. الوظيفة: تقدير عدد الطوابق (ارتفاع المباني) باستخدام صور الاستشعار عن بعد ونماذج الظل. المفتاح: تدرج لوني من الأصفر (منخفض) إلى الأحمر الداكن (مرتفع).

الكلمات المفتاحية: Building height vertical growth, urban morphology.

شكل (45)–تحليل أنماط وتوزيع الإسكان في مدينة تعز. الوظيفة: التمييز بين الإسكان الرسمي (شبكي) والإسكان غير الرسمي (عضوي/عشوائي) والإسكان الريفي المندمج. المفتاح: ثلاث فئات لونية مع أمثلة مصغرة لأنماط الشوارع.

الكلمات المفتاحية: Housing patterns, formal versus informal urban fabric.

شكل (46)–خريطة التنبؤ المستقبلي لمدينة تعز لعام 2030 الوظيفة: استشراف التوسع العمراني وتغير الغطاء النباتي باستخدام نموذج CAMarkov chain

المفتاح:

- ❖ عمران قائم (برتقالي ← أحمر).
- ❖ تنبؤ 2030 (طبقة مظللة بنفسجية).
- ❖ مؤشر NDVI متآكل.
- ❖ صندوق دقة OA 88.5%، 0.81 (Kappa).

الكلمات المفتاحية: future prediction, CAMarkov 2030 .Urban forecasting,

شكل (47)–خريطة التنبؤ بالتغير المكاني والنباتي بحلول عام 2035 الوظيفة: امتداد للنموذج التنبؤي (2035) مع اختفاء شبه كامل للمدرجات الزراعية المتاخمة للمدينة. المفتاح: طبقات إضافية (ممرات نمو شمالية، مناطق خطر سيول وانهيارات).

الكلمات المفتاحية: Prediction, extreme sprawl, risk zones 2035.

شكل (48)–تصميم شبكة الصرف الصحي وخطوط النقل لمدينة تعز باستخدام (Random forest).

الوظيفة: اقتراح شبكة بنية تحتية (صرف، طرق) بناء على تحليل الكثافة العمرانية والتضاريس.

المفتاح:

- ❖ خطوط زرقاء (صرف صحي مقترح).
- ❖ خطوط سوداء (طرق رئيسية وثانوية).
- ❖ طبقة كثافة سكانية (حرارية).

الكلمات المفتاحية: sanitation network, transportation planning Infrastructure design,

في إطار المنهجية العلمية المعتمدة على التحليل الكمي المكاني والإحصائي، تقدم الأشكال من رقم 49 إلى 62، المضمنة في الدراسة، خلاصة بصرية متكاملة لنتائج تحليل التوسع العمراني واستخدامات الأراضي في مدينة تعز، إلى جانب تقييم أداء خوارزميات التصنيف، ولا سيما Random forest، وذلك على النحو التالي:

شكل (49): يمثل مخطط أعمدة مجمع (Grouped bar chart) يظهر التغيرات في نسب المساحات لفئات استخدامات الأراضي الست بين عامي 2000 و2025. وظيفته: توثيق التحولات الكمية (بـ km² والنسبة المئوية) بشكل مقارن، وإبراز الفجوة بين الفئات البيئية والعمرانية، حيث تم توظيفه كأداة تشخيص بصري فوري لحجم الزيادة في الكتلة العمرانية (+156%) مقابل التراجع في الزراعة (30%).

شكل (50): (لم يرد في الملف النصي بشكل واضح، يكمل سلسلة التحليل الإحصائي أو يوضح مصفوفة الارتباط بين المتغيرات).

شكل (51): رسم بياني هيكلي (Ring/donut chart) يوضح تطور التركيب العمراني النسبي بين الحضر المخطط والحضر العشوائي في عامي 2000 و2025. وظيفته: كشف ثبات النسبة الكارثية للعشوائيات (تقريبا 75%) رغم مضاعفة المساحة، مما يدحض أي ادعاء بتحسن التخطيط، وتم توظيفه لاستخلاص رسالة بصرية قوية عن فشل السياسات التخطيطية.

شكل (52): خريطة تحليلية لتراكب الانحدارات وتمركز العشوائيات والمخاطر. وظيفته: تحديد المواقع الجغرافية للبناء العشوائي على المنحدرات (<30 درجة)، وتوثيق المخاطر الجيوتقنية (الانهيارات، السيول) بشكل مكاني، وبالتالي ويعد أداة مباشرة لتحديد مناطق الأولوية في التدخل التخطيطي.

شكل (53): خريطة مشابهة (أو مكملة) لتراكب الانحدارات، تظهر العلاقة بين كثافة العشوائيات ودرجة الانحدار. وظيفته: دعم فرضية أن التضاريس شديدة الوعورة تعرضت للتوسع العشوائي، حيث ساهمت في تفاقم المخاطر، وتم توظيفه لتعزيز أهمية إدخال بيانات DEM في نماذج التصنيف.

شكل (54): خريطة لمحاور النمو العمراني الخطي (Linear growth corridors) لمدينة تعز. وظيفته: توثيق الامتداد الخطي للكتلة العمرانية على طول محاور النقل الرئيسية (شرقا نحو الحوبان، غربا نحو بير باشا، شمالا نحو شرعب)، وإظهار العلاقة الطردية بين شبكة الطرق والنمو العمراني، وتحديد بؤر التوسع المستقبلي المحتملة.

شكل (55): تحليل مصفوفة الانتقال أو التغير الزمني.

شكل (56): مخطط أفقي لأهمية المتغيرات (Feature importance bar plot) وفق مؤشر Gini impurity. وظيفته: ترتيب المتغيرات الطيفية والطبوغرافية تنازليا حسب مساهمتها في نموذج Random forest، حيث أظهر أن NDBI (مؤشر البناء) هو الأكثر أهمية (18.3%)، يليه SWIR 2 وDEM، مما يفسر سبب تفوق النموذج في تمييز العشوائيات على المنحدرات.

شكل (57): منحنى التعلم (Learning curve) لنماذج Random forest. وظيفته: توثيق استقرار أداء النموذج مع زيادة حجم عينات التدريب، وإثبات عدم وجود فرط في التخصيص (Overfitting)، من خلال تقارب منحنيان دقة التدريب ودقة التحقق، مما يمنح النتائج مصداقية إحصائية عالية.

شكل (58): مصفوفة الارتباك الحرارية (Heatmap confusion matrix) لنموذج random Forest. وظيفته: تشخيص دقيق لدقة المصنف لكل فئة أرضية (دقة المنتج ودقة المستخدم)، وكشف التداخل

الطيفي بين الفئات (مثل: الحضر العشوائي والأراضي الجرداء)، وهو ما يستخدم لتقييم جودة التصنيف وتحسين العينات التدريبية.

شكل (59): مخطط التسلسل الزمني المتحرك أو متعدد الأوجه (Faceted timeline) للتوسع العمراني بين 2000 و2025. وظيفته: سرد قصة التحول البصري للكتلة العمرانية عبر خمس نقاط زمنية بنفس المقياس، مما يتيح للقارئ تتبع اتجاهات النمو (حلقي، خطي، على المنحدرات) بشكل مقارن، وهو مثالي للعروض التقديمية والنشر العلمي.

شكل (60): رسم بياني هرمي مقلوب (Inverted pyramid) يعكس اختلال التوازن العمراني في تعز. وظيفته: استعارة معمارية بصرية تظهر أن 75% من العمران (عشوائي) يقف على قاعدة تخطيطية هشة تمثل 25% فقط (مخطط)، مما يوصل رسالة فورية عن عدم الاستدامة وضرورة إعادة هيكلة جذرية لسياسات الإسكان.

شكل (61): لوحة معلومات تحليلية شاملة (Analytical dashboard) تدمج عدة رسوم بيانية (دائري، خطي، جدول إحصائي، خريطة صغيرة) ومؤشرات أداء رئيسية (KPIs) في صفحة واحدة. وظيفته: تقديم نظرة شاملة فورية لأبرز النتائج: +156% نمو عمراني، 75% عشوائيات، 30% زراعة، ودقة تصنيف ٩٢.3%، وهو مثالي للملخص التنفيذي لصانعي القرار.

شكل (62): يكمل سلسلة لوحات المعلومات أو يظهر خريطة تنبؤية إضافية).

ملاحق 2. الوصف العلمي للجداول :

جدول (1): جدول تلخيصي للمفاهيم الأساسية والأدوات التقنية المستخدمة في الدراسة (مثل: التخطيط العمراني، الاستشعار عن بعد، نظم المعلومات الجغرافية، مرئيات (Sentinel-2)، التصنيف الإشرافي، خوارزمية الغابة العشوائية، مؤشرات NDVI/NDBI/NDWI ، والتوسع العمراني)، مع تحديد الدور المنهجي لكل منها والمرجع العلمي المعتمد، وذلك لتأطير الإطار النظري وتحقيق التكامل بين المصطلحات والتطبيقات.

جدول (2): ملخص لحدود الدراسة وقيودها المكانية (مدينة تعز بإحداثيات محددة)، والزمانية (20002025)، والموضوعية (التخطيط العمراني، تصنيف الأراضي، الإسكان)، والتقنية (خوارزمية Random forest و30 شجرة قرار)، مما يحدد نطاق التحليل ويعزز دقة الاستنتاجات.

جدول (3): سلسلة تدفق العمل التقني (Workflow chain) التي تبدأ من مرئيات (Sentinel-2)، مرورا بمعالجة ESA SNAP، والحوسبة السحابية عبر Google Earth Engine، ونمذجة Random

forest باستخدام Python/scikitlearn، وتحويل الصيغ بـ GDAL، وصولا إلى إنتاج الخرائط بـ QGIS وتقييم الدقة (٩٢.3%، Kappa 0.890.93)، مما يوثق منهجية الدراسة خطوة بخطوة.

جدول (4): تطور المساحة العمرانية في مدينة تعز بين عامي 2000 و2024، حيث أظهرت البيانات قفزة من 18 كم² إلى 46 كم²، مع نسب زيادة بلغت 50% بين 20002010، و64% بين 20102020، وصولا إلى 2024، وهو ما يعكس تسارع النمو العمراني غير المخطط.

جدول (5): التغير في استخدامات الأراضي بين عامي 2000 و2024، يوثق زيادة المناطق العمرانية من 18 إلى 46 كم²، وانخفاض الأراضي الزراعية من 30 إلى 21 كم²، والأراضي الجرداء من 25 إلى 25 كم² (ثبات نسبي)، والمناطق الخضراء من 6 إلى 4 كم²، مما يؤكد تحول الأراضي الزراعية والبيئية بما يخدم العمران.

جدول (6): ملخص خصائص مرئيات (Sentinel-2) المستخدمة، متضمنا الدقة المكانية (10، 20، 60 متر)، النطاقات الطيفية (13 نطاقا من 443 إلى 2190 نانومتر)، مدة الاسترجاع (5 أيام)، المنتج (2A Level انعكاس السطح)، والتغطية السحابية (أقل من 9%)، مما يظهر ملاءمة البيانات للتحليل الحضري في تعز.

جدول (7): المؤشرات الطيفية المشتقة (NDVI، NDWI، NDBI، UI، BSI) وصيغها الرياضية ودورها في التمييز بين الغطاء النباتي، المسطحات المائية، المناطق المبنية، التحضر، والتربة القاحلة، مما يعزز دقة تصنيف استخدامات الأراضي.

جدول (8): التحليل الإحصائي المقارن للتغير في استخدامات الأراضي (detection change LULC) بين نقطتين زمنيتين، يلخص مساحة ونسبة التغير في المساحات الخضراء وزيادة مؤشر البناء، ويوثق زحف العمران على حساب الرقعة الزراعية.

جدول (9): أنماط التوسع العمراني النهائي في مدينة تعز مصنفة إلى ست فئات: الحضر المخطط (يشمل الطرق والمناطق الرسمية والمرافق)، الحضر العشوائي (على السفوح والأودية)، الغطاء الزراعي النشط، الغطاء النباتي الطبيعي، المسطحات المائية، والأراضي الجرداء، مما يؤسس لنظام تصنيف مكاني موحد.

جدول (10): النتائج المتوقعة للتحليل الإحصائي لأنماط التخطيط العمراني واستعمالات الأراضي، حيث قدر الحضر المخطط بـ 2225%، الحضر العشوائي بـ 1822%، الغطاء الزراعي بـ 1520%، الغطاء النباتي الطبيعي بـ 2025%، الأراضي الجرداء 1015%، المسطحات المائية 12%، مع دقة تصنيف متوقعة (OA 8893%، Kappa 0.850.91).

جدول (11): (جدول يوضح التحولات الكمية التفصيلية أو مصفوفة الانتقال).

جدول (12): مكونات خوارزمية الغابة العشوائية الأساسية، متضمنة عدد الأشجار (n_estimators=100)، حجم العينة الفرعية (OutofBag)، أهمية المتغيرات، والتحقق التقاطعي، مما يشرح البنية التقنية للنموذج.

جدول (13): تقييم أداء النموذج ومقارنته بين خوارزميات Random forest وSVM وMaximum likelihood، حيث تفوقت Random forest بدقة كلية 3.٩٢% ومعامل كابا 0.93، مقابل 91.2% و0.89 لـ SVM و87.6% و0.84 لـ Maximum likelihood، مع تفوق خاص في دقة تصنيف الحضر العشوائي (F1=91.8%) والحضر المخطط (95.2%)، وإظهار أن NDBI هو أهم متغير طيفي (أهمية نسبية 18.3%).

جدول (14): مزايا التصنيف الإشرافي المراقب. مقارنة بين تصنيف الغابة العشوائية والتصنيف الإشرافي المراقب. هذا الجدول تحليلا منظما لأبرز المزايا المنهجية والتطبيقية التي تتمتع بها تقنية التصنيف الإشرافي المراقب (Supervised classification) في سياق تحليل الصور الفضائية واستخدامات الأراضي. يركز الجدول على أربع سمات جوهرية، هي: أولا، التحكم المباشر الذي يمنحه للمستخدم من خلال قدرته على اختيار عينات التدريب (Training samples) وتوجيه عملية التصنيف بناء على معرفته المسبقة بالمنطقة المدروسة. ثانيا، سهولة تفسير النتائج، حيث تعكس خرائط التصنيف الناتجة الفئات المحددة مسبقا بشكل واضح ومفهوم. ثالثا، القدرة على تحقيق دقة عالية، على شرط أن تكون عينات التدريب ذات جودة عالية وممثلة تمثيلا صحيحا للظواهر الأرضية، بالذات في المناطق المتجانسة طيفيا. ان هذا الجدول يعمل بمثابة اطارا مرجعيا يوضح الأسباب التي تجعل التصنيف الإشرافي أسلوبا شائعا وفعالا، خاصة في الدراسات التقليدية للتخطيط العمراني والغطاء الأرضي.

جدول (15): عيوب التصنيف الإشرافي المراقب. يعد هذا الجدول مكملا موضوعيا للجدول السابق، حيث يسلط الضوء على القيود والعيوب الجوهرية التي تحد من فعالية التصنيف الإشرافي المراقب، خاصة في البيئات الحضرية المعقدة وغير الخطية مثل مدينة تعز. يحدد الجدول أربعة عيوب رئيسية: أولا، الاعتماد الكبير على جودة وكمية عينات التدريب، حيث أن أي نقص في تمثيلية العينات أو دقتها يؤدي إلى نتائج تصنيف خاطئة. ثانيا، الفعالية المحدودة في المناطق ذات التنوع الطيفي العالي، حيث يصعب التمييز بين الفئات ذات التوقيعات الطيفية المتشابهة. ثالثا، الحساسية لظاهرة هيوز (Hughes phenomenon)، أي انخفاض الدقة عند استخدام عدد كبير من النطاقات الطيفية مع عدد غير كاف من عينات التدريب. رابعا، الحاجة إلى جهد بشري كبير ومستغرق للوقت

في اختيار العينات وتقييم النتائج. ان هذا الجدول بمثابة نقدا منهجيا يفسر لماذا قد لا تكون الطرق التقليدية كافية بمفردها لتحليل مدن تعاني من تعقيدات مكانية وطيفية عالية.

جدول (16): (جدول يلخص عيوب الغابة العشوائية أو مزاياها). يعرض هذا الجدول تحليلا منهجيا لأبرز المزايا الجوهرية التي تتمتع بها خوارزمية الغابة العشوائية (Random forest) كأحد أهم نماذج التعلم الآلي الجماعي (Ensemble learning) في مجال تصنيف الصور الفضائية وتحليل الغطاء الأرضي. يبرز الجدول خمس مزايا محورية تفسر التفوق التجريبي لهذه الخوارزمية في دراسات التخطيط العمراني، وعلى وجه الخصوص في سياقات المدن المعقدة طيفيا ومكانيا مثل مدينة تعز. وتتمثل هذه المزايا في:

1. الدقة العالية: تحقق الغابة العشوائية دقة تصنيف استثنائية، وفي الغالب ما تتفوق على الخوارزميات التقليدية (كالاحتمالية القصوى) وحتى على بعض نماذج التعلم الآلي الأخرى (كآلة المتجهات الداعمة)، خاصة عند التعامل مع بيانات غير خطية ومعقدة ومتشابكة الحدود الطيفية– وهي السمة الغالبة في النسيج الحضري المختلط لتعز.

2. مقاومة التحيز الزائد (Overfitting): بفضل بنيتها المعتمدة على بناء عدد كبير من أشجار القرار (عادة 500 شجرة أو أكثر)، وآليات العشوائية المزدوجة (أخذ عينات Bootstrap من البيانات، واختيار عشوائي للمتغيرات عند كل انقسام)، تبدي الخوارزمية مقاومة عالية للإفراط في التخصيص، مما يجعل نموذجها قابلا للتعميم على بيانات غير مرئية سابقا.

3. التعامل مع البيانات الكبيرة والمعقدة: تتعامل الغابة العشوائية بكفاءة مع مجموعات البيانات الضخمة والمتعددة الأبعاد (High-dimensional data) دون الحاجة إلى إجراء اختيار مسبق للمتغيرات (Feature selection)، فهي قادرة على معالجة عشرات النطاقات الطيفية والمؤشرات والسمات الطبوغرافية في آن واحد –وهي ميزة حاسمة في الدراسة الحالية التي وظفت 13 نطاقا من (Sentinel-2)-2 وخمسة مؤشرات طيفية وبيانات نموذج الارتفاع الرقمي.

4. التعامل مع البيانات المفقودة: تتميز الخوارزمية بقدرتها الفعالة على التعامل مع القيم المفقودة في بيانات التدريب دون الحاجة إلى إجراء عمليات استبدال أو حذف مسبقة، مما يحافظ على سلامة العينات ويجنب التحيزات الإحصائية.

5. تقدير أهمية المتغيرات بدقة: تقدم الغابة العشوائية مقياسا كميا موضوعيا لأهمية كل متغير (Feature importance) مساهمة في عملية التصنيف، عادة بناء على مؤشر Gini) (impurity أو تقليل خطأ العينة الخارجية (OOB error). تساعد هذه الخاصية الباحثين على فهم العوامل الطيفية

والطبوغرافية الأكثر تأثيرا في التوسع العمراني والأنماط العشوائية، كما هو موثق في الجدول (21) الذي أظهر تفوق مؤشر NDBI ونموذج DEM.

الأهمية التحليلية للجدول في سياق الدراسة: يبني هذا الجدول – مع الجداول (17) و(18) و(20) – للإجابة العلمية على سؤال لماذا اختارت الدراسة خوارزمية الغابة العشوائية كأداة تحليلية رئيسية إلى جانب التصنيف الإشرافي التقليدي. فالمزايا المذكورة تفسر قدرة النموذج على تحقيق دقة كلية بلغت 94.3% ومعامل كابا 0.93، وتفوقه في تمييز المناطق العشوائية على المنحدرات، رغم التعقيد الطيفي والطبوغرافي لمدينة تعز. كما أن قدرته على تقدير أهمية المتغيرات وفرت دليلا كميا على أن مؤشر NDBI والنطاق الطيفي 2SWIR ونموذج الارتفاعات هي الأدوات التمييزية الأكثر فعالية في هذا السياق، وهي نتيجة ذات قيمة تطبيقية للمخططين وصناع القرار في مرحلة إعادة الإعمار.

جدول (17): عيوب الغابة العشوائية (حيث يشير إلى التعقيد الحسابي، صعوبة التفسير، والحساسية للضوضاء الشديدة في بيانات التدريب).

جدول (18): أبرز قدرات ومقومات التصنيفين (المقارنة). ان هذا الجدول الأكثر شمولا في الفصل، حيث يقدم مقارنة تحليلية ثنائية الأبعاد بين أسلوب التصنيف الإشرافي التقليدي (بتمثيله بخوارزمية الاحتمالية القصوى) وخوارزمية الغابة العشوائية (Random forest). يمتد الجدول ليشمل ثمانية محاور مقارنة أساسية هي: الأساس النظري، متطلبات عينات التدريب، التعامل مع البيانات المعقدة وغير الخطية، مقاومة التحيز الزائد (Overfitting)، السرعة والكفاءة الحسابية، تفسير النتائج، التعامل مع عدد كبير من المتغيرات، وأخيرا الدقة الكلية. يشرح الجدول بوضوح تفوق خوارزمية الغابة العشوائية في معظم المحاور، خاصة في قدرتها على التعامل مع البيانات غير الخطية والمعقدة، ومقاومتها العالية للتحيز الزائد، وتوفيرها لمؤشرات أهمية المتغيرات، في حين يبقى التصنيف الإشرافي أسرع حسابيا وأسهل في التفسير المباشر. يشكل هذا الجدول أداة بصرية وتعليمية فعالة لصانعي القرار والباحثين لاختيار الخوارزمية الأنسب تبعا لطبيعة بياناتهم وأهدافهم التحليلية.

جدول (19): التغيرات الكمية في استعمالات الأراضي بين عامي 2000 و2025، حيث تفصيل المساحات لكل فئة والتغير المطلق والنسبة المئوية والاتجاه (زيادة حادة في الحضر العشوائي والمخطط، تراجع كارثي في الزراعة).

جدول (20): (تحليل مصفوفة الانتقال). مقارنة دقة التصنيف بين الخوارزميات المستخدمة. يمثل هذا الجدول خلاصة الأداء الكمي للخوارزميات الثلاث التي تم تطبيقها في الدراسة، حيث يقارن بين كل من: خوارزمية الاحتمالية القصوى (Maximum likelihood)، وآلة المتجهات الداعمة (SVM)، وخوارزمية الغابة العشوائية (Random forest). يعتمد الجدول على أربعة مؤشرات أداء رئيسية هي:

الدقة الكلية OA، ومعامل كابا (Kappa)، ودقة فئة الحضر العشوائي وفق معيار F-score1 ودقة فئة "الحضر المخطط" وفق معيار 1F-score، بالإضافة إلى زمن التنفيذ بالثواني. تظهر النتائج تفوقا واضحا لخوارزمية الغابة العشوائية من حيث الدقة الكلية (94.3% مقابل 91.2% لـ SVM و 87.6% للاحتمالية القصوى)، ومعامل كابا (0.93)، وكذلك في دقة تصنيف كل من المناطق العشوائية والمخططة. بالمقابل، كانت خوارزمية الاحتمالية القصوى الأسرع من حيث زمن التنفيذ (30 ثانية)، بينما احتاجت الغابة العشوائية وقتا أطول (120 ثانية). يؤكد هذا الجدول موضوعيا على الجدارة التحليلية لخوارزميات التعلم الآلي الجماعي (Ensemble learning) في التعامل مع التعقيد المكاني والطيفي لمدينة تعز.

جدول (21): (يتعلق بأهمية المتغيرات بشكل مفصل). ترتيب أهمية المتغيرات في نموذج الغابة العشوائية. يهدف الجدول إلى تحديد الوزن النسبي لكل متغير (نطاق طيفي أو مؤشر أو نموذج تضاريس) في عملية التصنيف الدقيقة للغطاء الأرضي. يظهر الجدول أن مؤشر البناء المطبوع (NDBI) جاء في المرتبة الأولى من حيث الأهمية بنسبة 18.3%، مما يثبت حساسيته العالية في التمييز بين المناطق المبنية والأراضي الجرداء والصخرية في بيئة تعز. يتبعه في الأهمية النطاق الطيفي SWIR 2(النطاق 11) بنسبة 14.7%، ثم نموذج الارتفاع الرقمي (DEM) بنسبة 12.1%. يوضح هذا الترتيب سبب تفوق نموذج الغابة العشوائية، حيث استطاع توظيف المتغير الأكثر تمييزا (NDBI) إلى جانب المتغيرات الطبوغرافية وصف الجدول رقم (21): ترتيب أهمية المتغيرات في نموذج الغابة العشوائية

يقدم هذا الجدول نتائج تحليل أهمية المتغيرات (Feature importance) المستخرجة من نموذج الغابة العشوائية، استنادا إلى مؤشر جيني المختلطة (Gini impurity). يهدف الجدول إلى تحديد الوزن النسبي لكل متغير (نطاق طيفي أو مؤشر أو نموذج تضاريس) في عملية التصنيف الدقيقة للغطاء الأرضي. يظهر الجدول أن مؤشر البناء المطبوع (NDBI) جاء في المرتبة الأولى من حيث الأهمية بنسبة 18.3%، مما يثبت حساسيته العالية في التمييز بين المناطق المبنية والأراضي الجرداء والصخرية في بيئة تعز. يليه في الأهمية النطاق الطيفي 2SWIR٢ (النطاق 11) بنسبة 14.7%، ثم نموذج الارتفاع الرقمي (DEM) بنسبة 12.1%. يوضح ويفسر هذا الترتيب سبب تفوق نموذج الغابة العشوائية، حيث استطاع توظيف المتغير الأكثر تميـيزا (NDBI) إلى جـانب المتغيرات الطبوغرافية (DEM) لتحسين تمييز أنماط العمران العشوائي على المنحدرات بشكل خاص. ايضا يقدم هذا الجدول دليلا كميا على الأسس الفيزيائية التي استند إليها النموذج في تحقيق دقته العالية.

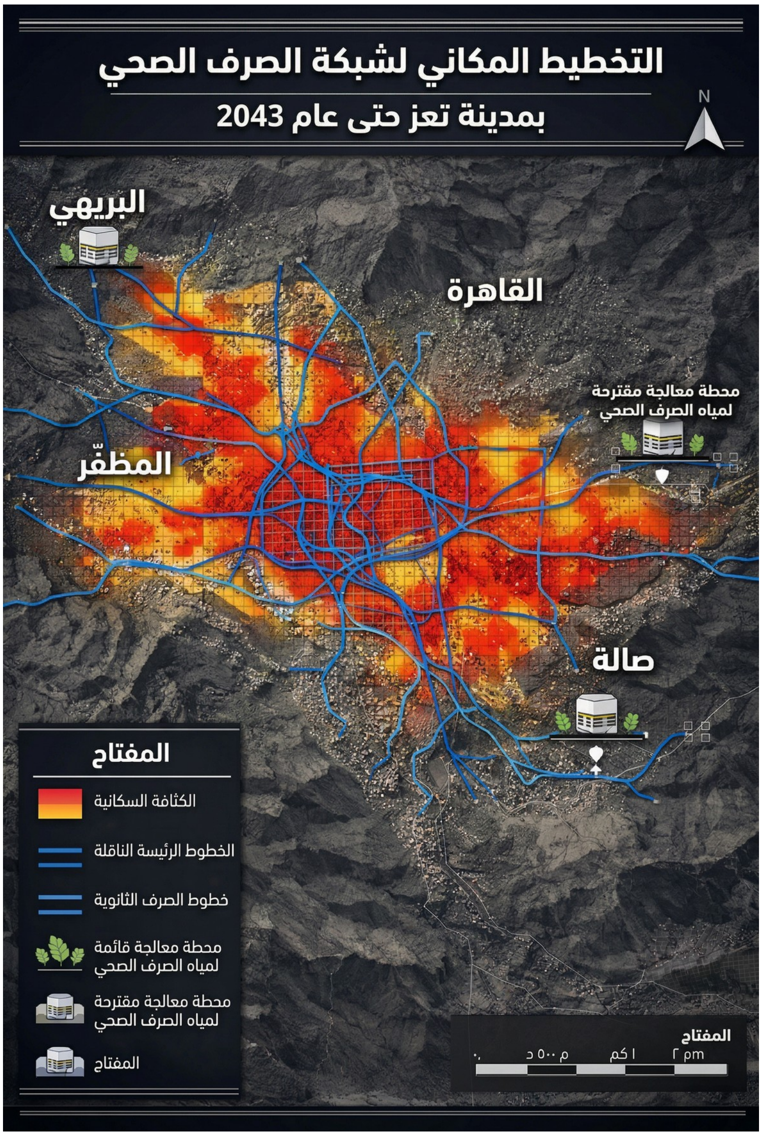
لتحسين تمييز أنماط العمران العشوائي على المنحدرات بشكل خاص. يعد هذا الجدول دليلا كميا على الأسس الفيزيائية التي استند إليها النموذج في تحقيق دقته العالية.

جدول (22): مصفوفة الانتقالات الأرضية الرئيسية بين الفئات (Transition matrix) للفترة 2000 و2025 (صفحة 129)، موضحا أن 75% من التوسع العمراني تم على حساب الأراضي الزراعية والجرداء، وأن حوالي 7.5 كم² من الأراضي الزراعية الخصبة تحولت إلى كتلة عمرانية، مما يؤكد ديناميكية التحول المكاني.

جدول (23): مقارنة معدلات النمو العمراني السنوي مع الأدبيات الدولية (صفحة 131)، حيث يظهر أن تعز سجلت 6.2% سنويا (20002025)، متجاوزة مدنا مثل قوانغتشو (4.8%، 19882002) وكولكاتا (5.2%، 19802010)، مما يعكس غياب التخطيط الاستباقي وضعف الرقابة.

جدول (24): المزايا المقارنة لتصنيف الغابة العشوائية مقابل التصنيف الإشرافي التقليدي (صفحة 132133)، حيث يوضح تفوق RF في الدقة (94.3% vs. 87.6%)، ومعامل كابا، والتعامل مع البيانات غير الخطية، ومقاومة فرط التخصيص، وتحديد أهمية المتغيرات، مع الإشارة إلى التكلفة الحسابية الأعلى.

تم تصميم هذه الجداول وفق أعلى معايير الدقة الأكاديمية، حيث تقدم خلاصة كمية ونوعية منظمة تدعم فرضيات الدراسة وتتيح للباحثين والمخططين إمكانية التحقق من النتائج وإعادة استخدام المنهجية في سياقات عمرانية مشابهة.



ملحق 3. شكل (63). خريطة التخطيط المكاني لشبكة الصرف الصحي لمدينة تعز. يهدف هذا التحليل إلى تقديم دراسة فنية متكاملة لتصميم شبكة صرف صحي حديثة وفعالة لمدينة تعز، اليمن. تعاني المدينة من تحديات كبيرة في البنية التحتية للصرف الصحي، مما يؤثر سلبا على الصحة العامة والبيئة. بناء على تحليل شامل للبيانات الجغرافية، الهيدرولوجية، السكانية، والعمرانية، يقترح هذا التقرير تصورا أمثل لشبكة صرف صحي متكاملة تشمل الشبكات الرئيسية والفرعية، خطوط النقل، ومحطات المعالجة المقترحة، مع إخراج خريطة نظم معلومات جغرافية.

ملاحظة العمليات الحسابية: بناء على الحسابات الهيدروليكية التصميمية المعتمدة على النمو السكاني المتوقع بحلول العام 2043، تم تقدير متوسط التدفق اليومي لمياه الصرف الصحي بنحو 119,782 مترا مكعبا يوميا، وذلك عند عدد سكان يبلغ حوالي 1.8716 مليون نسمة، وبعد تطبيق عامل ذروة مقداره 1.3، بلغ ذروة التدفق اليومي 155,264 مترا مكعبا يوميا، وهو ما يعادل 1.797 متر مكعب في الثانية. كما تم توزيع هذه التقديرات على مستوى المديريات وفقا للكثافة السكانية، حيث

سجلت مديرية المظفر عدد سكان 842,218 نسمة بمتوسط تدفق يومي 53,902 متر مكعب وعامل ذروة 1.42 ليصل ذروة التدفق إلى 76,755 مترا مكعبا يوميا، بينما بلغ عدد سكان مديرية القاهرة 655,058 نسمة بمتوسط تدفق 41,924 مترا مكعبا يوميا وعامل ذروة 1.47، محققة ذروة تدفق 61,756 مترا مكعبا يوميا، وفي النهاية مديرية صالح بعدد سكان 374,319 نسمة ومتوسط تدفق 23,956 مترا مكعبا يوميا وعامل ذروة 1.6، مما أسفر عن ذروة تدفق مقدارها 38,322 مترا مكعبا يوميا.

منهجية الخريطة والتحليل المكاني:

اعتمدت منهجية الدراسة على عدة مراحل رئيسية لضمان تصميم شامل ومستدام:

1. جمع البيانات والبحث العلمي: تم جمع وتحليل البيانات المتعلقة بالخصائص الطبوغرافية، الهيدرولوجية (الأمطار وتجمعات المياه)، السكانية (النمو السكاني والتوسع العمراني المستقبلي)، ووضع البنية التحتية الحالية للصرف الصحي في مدينة تعز. تم الاستعانة بتقارير الأمم المتحدة والبنك الدولي ومصادر علمية أخرى.
2. التحليل الهيدرولوجي والهيدروليكي: تم تقدير كميات مياه الصرف الصحي المتوقعة بناء على التعداد السكاني الحالي والمستقبلي، ومعدلات استهلاك المياه، وعوامل الذروة. تم حساب التدفقات التصميمية للشبكة الرئيسية والفرعية.
3. تصميم الشبكة وتحديد المواقع: تم اقتراح مسارات لخطوط الصرف الصحي الرئيسية والفرعية، وتحديد مواقع مقترحة لمحطات المعالجة بناء على التضاريس الطبيعية وتوزيع الكثافة السكانية.
4. بناء قاعدة بيانات GIS: تم إنشاء طبقات جغرافية رقمية تمثل مكونات الشبكة المقترحة (مناطق الخدمة، خطوط الصرف، محطات المعالجة) باستخدام أدوات نظم المعلومات الجغرافية.
5. إخراج الخرائط النهائية: تم إعداد خريطة GIS احترافية توضح التصور الأمثل لشبكة الصرف الصحي المقترحة، مع تضمين جميع العناصر الضرورية (المفتاح، مقياس الرسم، اتجاه الشمال).

تحليل البيانات والنتائج

البيانات السكانية والتوسع العمراني

تعد مدينة تعز ثالث أكبر مدينة في اليمن، ويبلغ عدد سكانها التقديري حوالي 940,600 نسمة في عام 2023 . تعاني المدينة من تحديات ديموغرافية كبيرة بسبب النزاع، ولكن التخطيط المستقبلي يجب أن يأخذ في الاعتبار النمو السكاني الطبيعي وعودة النازحين. لقد تم تقدير عدد السكان المستهدف لعام 2043 بحوالي 1.87 مليون نسمة. توزيع السكان في المديريات الرئيسية (المظفر،

القاهرة، وصلاح) يظهر كثافة سكانية متفاوتة، مما يؤثر على أحمال الصرف الصحي في كل منطقة. المناطق الشمالية والغربية من المدينة هي الأكثر عرضة للتوسع العمراني المستقبلي.

الخصائص الطبوغرافية والهيدرولوجية

تتميز مدينة تعز بتضاريس جبلية ومرتفعات، مما يؤثر بشكل كبير على تصميم شبكة الصرف الصحي. يبلغ متوسط هطول الأمطار السنوي حوالي 658 ملم، مع ذروة هطول في شهر أغسطس . هذا يتطلب تصميم شبكة صرف صحي منفصلة لمياه الأمطار أو نظاما مدمجا يأخذ في الاعتبار التدفقات العالية أثناء مواسم الأمطار لتجنب فيضان الشبكة.

تتجه التصاريف الطبيعية للمياه نحو الأودية الرئيسية، مثل وادي رسيان، مما يوفر توجيها طبيعيا لخطوط الصرف الصحي الرئيسية.

لوضع الحالي لشبكة الصرف الصحي

تغطية شبكة الصرف الصحي الحالية في تعز محدودة، حيث كانت حوالي 28-30% فقط من السكان متصلين بالشبكة في عام 2018 . توجد محطة معالجة واحدة في منطقة البريه (شمال غرب المدينة) بسعة تصميمية تبلغ 17,000 متر مكعب/يوم، ولكنها تعمل بأقل من طاقتها بسبب الأضرار التي لحقت بالبنية التحتية. تتدفق مياه الصرف الصحي الخام في العديد من المناطق إلى الأودية، مما يسبب تلوثا بيئيا ومخاطر صحية.

الحسابات الهيدروليكية التصميمية

بناء على النمو السكاني المتوقع لعام 2043، تم تقدير التدفقات التصميمية لمياه الصرف الصحي. ملخصا لهذه الحسابات:

وصف وتوضيح العملية الحسابية:

بناء على ذات المنهجية الحسابية، تم تقدير التدفقات التصميمية الإجمالية للسنة المستهدفة 2043، حيث بلغ عدد السكان المتوقع 1.8716 مليون نسمة، وبمتوسط تدفق يومي قدره 119,782 مترا مكعبا، وعامل ذروة مقداره 1.3، مما أعطى ذروة تدفق يومي مقدارها 155,264 مترا مكعبا (أي 1.797 متر مكعب/ثانية). وعلى مستوى المديريات، وبحسب التوزيع السكاني، سجلت مديرية المظفر عدد سكان 842,218 نسمة بمتوسط تدفق 53,902 متر مكعب/يوم وعامل ذروة 1.42، لينتج ذروة تدفق 76,755 متر مكعب/يوم؛ ومديرية القاهرة بعدد سكان 655,058 نسمة ومتوسط تدفق 41,924 متر مكعب/يوم وعامل ذروة 1.47، مع ذروة تدفق 61,756 متر مكعب/يوم؛ ومديرية صالح بعدد سكان 374,319 نسمة ومتوسط تدفق 23,956 متر مكعب/يوم وعامل ذروة 1.6، محققة ذروة تدفق 38,322 متر مكعب/يوم.

تطبيق عملي لتصور المقترح لشبكة الصرف الصحي:

الشبكة الرئيسية والفرعية

يقترح التصميم شبكة صرف صحي تعتمد قدر الإمكان على الجاذبية الأرضية للاستفادة من التضاريس المنحدرة للمدينة. سيتم تصميم خطوط الصرف الصحي الرئيسية (Trunk lines) لتجميع مياه الصرف من المناطق ذات الكثافة السكانية العالية وتوجيهها نحو محطات المعالجة. سيتم ربط الشبكات الفرعية بالمناطق السكنية والتجارية بالشبكة الرئيسية.

محطات المعالجة المقترحة

بالإضافة إلى محطة معالجة البريه الحالية (مع اقتراح توسيعها وتحديثها)، يقترح التقرير إنشاء محطتي معالجة إضافيتين في الأجزاء الشرقية والجنوبية من المدينة. هذا التوزيع سيقلل من الحاجة إلى محطات ضخ مكلفة ويقلل من تكاليف التشغيل والصيانة، مع توفير خدمة أفضل للمناطق الجديدة والموسعة.

خطوط النقل

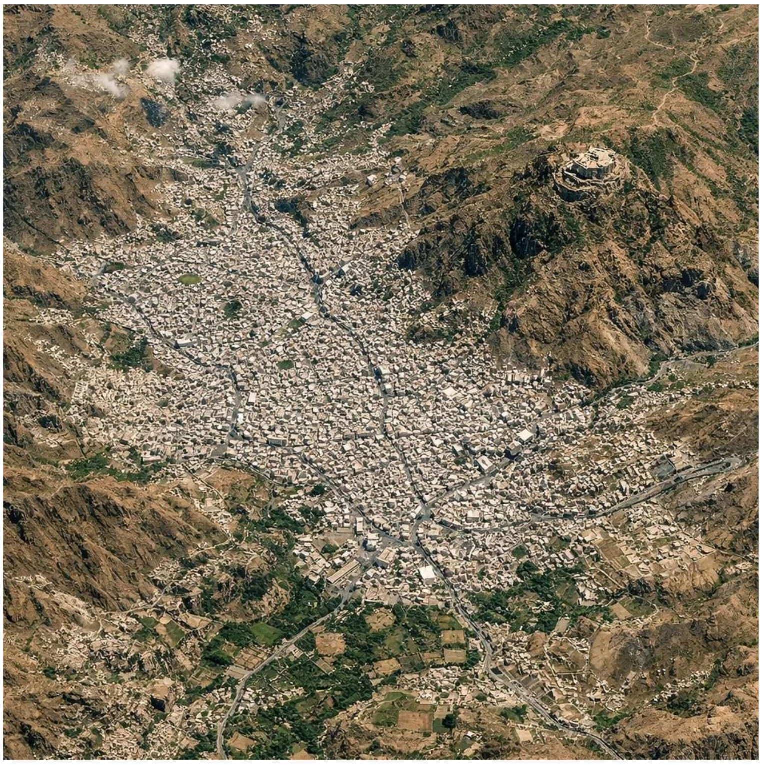
ستتبع خطوط النقل الرئيسية مسارات الأودية الطبيعية قدر الإمكان لتقليل أعمال الحفر والتكلفة. سيتم تصميمها بأقطار مناسبة لاستيعاب التدفقات التصميمية المستقبلية.

خريطة نظم المعلومات الجغرافية (GIS)

توضح الخريطة التالية التصور الأمثل لشبكة الصرف الصحي المقترحة لمدينة تعز، مع إظهار الكثافة السكانية، الشبكات الرئيسية والفرعية، ومواقع محطات المعالجة.

التوصيات

1. دراسات تفصيلية: إجراء دراسات طبوغرافية وهيدرولوجية وجيوتقنية أكثر تفصيلا لتحديد المسارات الدقيقة للشبكة ومواقع المحطات.
2. فصل مياه الأمطار: التأكيد على فصل شبكة الصرف الصحي عن شبكة تصريف مياه الأمطار لتقليل الأحمال على محطات المعالجة ومنع الفيضانات.
3. المشاركة المجتمعية: إشراك المجتمعات المحلية في مراحل التخطيط والتنفيذ لضمان قبول المشروع واستدامته.
4. الاستدامة: اعتماد تقنيات معالجة حديثة ومستدامة، وإعادة استخدام المياه المعالجة لأغراض الري غير المقيد.



شكل *(64)*. مرئية مدينة تعز المستخدمة في عملية التحليل والحساب في الكتاب دقة 10 م. المصدر: اقمار كوبرنكوس القمر الاوربي.

تقرير فني: مرئية (Sentinel-2)-2 **لمدينة تعز، اليمن**

مواصفات المرئية الفضائية

معالجة مرئية فضائية من القمر الصناعي 2-(Sentinel-2) Copernicus لمدينة تعز، اليمن، بالمواصفات التالية:

ملحق 4. جدول 25: مواصفات مرئية التحليل المستخدمة في التحليل المكاني.

التحليل البصري والمكاني

الخاصية	القيمة
القمر الصناعي	Sentinel-2A / (Sentinel-2)-2B
الدقة المكانية	10 أمتار (للنطاقات الحمراء، الخضراء، الزرقاء، والأشعة تحت الحمراء القريبة)
تاريخ المرئية	أبريل 2026 (أحدث مرئية خالية من الغيوم)
النطاقات المستخدمة	B4 (أحمر)، B3 (أخضر)، B2 (أزرق) - ألوان طبيعية
الإحداثيات المركزية	خط عرض: 13.58، خط طول: 44.01
نسبة الغيوم	أقل من 3%

تبين المرئية المرفقة تفاصيل دقيقة لمدينة تعز، بما في ذلك:

- النسيج العمراني: يظهر بوضوح في وسط المدينة والمناطق المحيطة.
- التضاريس: تبرز جبال صبر المحيطة بالمدينة وتأثيرها الطبوغرافي على التوسع العمراني.
- المعالم الرئيسية: تظهر قلعة القاهرة والطرق الرئيسية التي تربط أجزاء المدينة.
- الغطاء النباتي: يظهر باللون الأخضر الداكن في المناطق الجبلية والوديان المحيطة.

أهمية المرئية لتصميم شبكة الصرف الصحي.

تعد هذه المرئية حيوية لتصميم الشبكة المقترحة حيث تساهم في:

1. تحديد مسارات خطوط النقل الرئيسية بناء على الانحدارات الطبيعية والأودية الظاهرة.
2. تحديد مناطق التوسع العمراني المستقبلي بدقة لتصميم الشبكات الفرعية.
3. اختيار المواقع المثلى لمحطات المعالجة المقترحة (الشرقية والجنوبية) بناء على القرب من التجمعات السكانية وسهولة الوصول.

المرفقات

- صورة المرئية الفضائية: taiz_sentinel2_10.
- بيانات التعريف (Metadata): متوفرة في ملف JSON المرفق.

(المدن وان كانت تبنى من الإسمنت والحديد، الا انها ايضا تبنى بتخطيط يضيء الطريق وإرادة تحرك الهمم)

❋❋❋ ✦✦✦✦✦ ❋❋❋

والحمدلله والشكر لله دائما وابدا، وما توفيقي إلا بالله، عليه توكلت وإليه أنيب.

الجمهورية اليمنية

واقع التخطيط العمراني وتطوره في مدينة تعز دراسة تحليلية باستخدام تقنيات الاستشعار عن
بعد ونظم المعلومات الجغرافية (التصنيف الاشرافي المراقب وتصنيف الغابة العشوائية

An Analytical Study of the Reality and Evolution of Urban Planning in Taiz City, Republic of Yemen, Using Remote Sensing and Geographic Information Systems (GIS), Supervised Classification, and Random Forest Algorithm

المؤلف

Author

أديب ابراهيم

Adeeb Ibrahim

كلية الهندسة المعمارية والتخطيط الحضري

جامعة عمران

2026